This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

PAW

ÉTAT ACTUEL

DES

INDUSTRIES ÉLECTRIQUES

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS

CONFÉRENCES FAITES SOUS LES AUSPICES

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

ET DE LA

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1906

ÉTAT ACTUEL

DES

INDUSTRIES ÉLECTRIQUES

Extrait du *Bulletin des Séances de la Société française de Physique*,
Année 1905

ÉTAT ACTUEL

DES

INDUSTRIES ÉLECTRIQUES

CONFÉRENCES FAITES SOUS LES AUSPICES

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

ET DE LA

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES

55, Quai des Grands-Augustins, 55

1906

Tous droits réservés

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
744303 A
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
R 1934 L

CONFÉRENCES

SUR L'ÉTAT ACTUEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES

SUR LES TENDANCES ET LES RECHERCHES ACTUELLES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE (1);

Par M. Paul JANET,
Professeur à l'Université de Paris, directeur du Laboratoire central
et de l'École supérieure d'Électricité.

MESSIEURS,

L'industrie, comme la vie, est soumise à la loi de l'évolution : les productions et les développements industriels ne s'opèrent pas au hasard, et ce n'est que par exception que jaillit une invention de génie ; la plupart du temps, les actions de milieu agissent d'une manière presque nécessaire sur la transformation et le perfectionnement des organes techniques, et, par action de milieu, j'entends ici les besoins plus ou moins urgents dont la satisfaction s'impose d'une manière si logique que, s'ils ne sont pas remplis aujourd'hui, nous pouvons assurer qu'ils le seront demain.

Mais, tandis que l'évolution des phénomènes vitaux s'étend sur de longs siècles, celle des phénomènes industriels, surtout à l'époque où nous vivons, est si rapide que nous pouvons en saisir sur le vif et les causes et les effets.

Imaginons donc qu'un observateur, partant de l'état où se trouvait l'industrie électrique il y a une vingtaine d'années et observant l'état où elle se trouve aujourd'hui, se propose de rechercher quelles sont les raisons profondes et logiques qui ont amené les modifications successives et continues que nous constatons dans la forme, la dimension, l'agencement, les principes mêmes de nos machines ou appareils électriques ; c'est une étude de ce genre que je voudrais entreprendre devant vous ; elle nous montrera dans quelle direction

(1) Conférence faite le 28 avril 1905.

Blanchetan APR 28 1934

générale évolue l'Électrotechnique et, en prolongeant par la pensée cette évolution, dont nous aurons saisi un moment, peut-être pourrons-nous entrevoir ce que nous réserve l'avenir; cette prévision, sans doute, ne s'étendra pas bien loin; du moins aurons-nous essayé de donner un tableau d'ensemble de ce qui constitue aujourd'hui les idées régnantes et les préoccupations dans le monde des électriciens.

I

Commençons, comme il est juste, par les génératrices du courant électrique : trois éléments ont influé sur leur forme et leurs dimensions; ces éléments sont la puissance, la tension et la nature de la force motrice.

L'augmentation progressive de la puissance est un phénomène normal dont il n'y a pas lieu de s'étonner; meilleur rendement des grosses unités, moindre surveillance, prix moins élevé, encombrement moins grand, telles sont les qualités qui ont peu à peu amené les constructeurs à l'étude des grandes machines; la dynamo la plus puissante qui figurait à l'Exposition de 1889 avait 250 kilowatts; en 1900, elle atteignait 3.000 kilowatts; aujourd'hui on construit couramment des unités de 5.000 à 8.000 kilowatts. Il est douteux qu'on aille beaucoup plus loin, au moins dans la limite des besoins actuels; dans une station centrale, la puissance de chaque machine ne doit être qu'une petite fraction de la puissance totale, d'abord pour que chaque machine puisse, autant que possible, fonctionner constamment à pleine charge, ce qui est une condition essentielle d'économie, ensuite pour que l'arrêt accidentel d'une machine ne produise pas de trouble grave sur le réseau; si l'on réfléchit que, d'après les évaluations les plus récentes, les besoins d'une ville comme Paris ne dépassent pas, traction électrique mise à part, 70.000 à 80.000 kilowatts, on verra que des unités de 5.000 à 8.000 kilowatts conviennent bien en général et conviendront longtemps encore.

L'élévation des tensions s'est imposée dès que l'on a voulu étendre la portée et la puissance des transmissions électriques; on sait, en effet, que, pour un rendement donné, la tension au départ est proportionnelle à la distance, à la racine carrée de la puissance à transmettre, et inversement proportionnelle à la racine carrée du poids de cuivre immobilisé dans la ligne; autant de lois qui con-

cordent pour justifier les élévations de plus en plus grandes des tensions employées.

Quelle influence cette tendance à l'élévation progressive des tensions a-t-elle exercée sur la forme et les dimensions des machines ? C'est ce que nous allons examiner rapidement.

Ce qui limite la tension qu'on peut faire produire à une machine donnée, c'est uniquement, si l'on met à part les difficultés d'isolement, la vitesse à laquelle on peut faire tourner cette machine ; et ce qui limite cette vitesse, c'est la résistance des matériaux à la force centrifuge développée à la périphérie de la partie tournante. Cette force centrifuge est donc un élément essentiel à considérer dans la comparaison des machines. Or, on démontre aisément que, à force centrifuge égale, à induction moyenne égale dans l'entrefer, et pour un même nombre de conducteurs par unité de longueur à la périphérie, la force électromotrice d'une machine croît avec son rayon et avec sa profondeur (dimension parallèle à l'axe), mais plus rapidement avec son rayon qu'avec sa profondeur : on a donc été amené naturellement à augmenter progressivement le diamètre des parties tournantes plus encore que leur épaisseur ; mais en même temps, pour maintenir la force centrifuge dans des limites acceptables, il fallait réduire la vitesse angulaire de rotation : la machine moderne est donc devenue naturellement une machine de grand diamètre à marche lente. Pour fixer les idées, nous citerons les grands alternateurs de 5.000 kilowatts 11.000 volts, en service au métropolitain de New-York, qui tournent à 75 tours par minute et ont un diamètre de 5 mètres environ.

Le grand développement des moments d'inertie, la faible valeur des vitesses angulaires amena bientôt les parties tournantes des machines électriques à ressembler singulièrement aux volants des machines à vapeur : de là à confondre en un seul ces deux organes jusqu'alors séparés et à supprimer l'intermédiaire, inutile et gênant, des courroies de transmission, il n'y avait qu'un pas : c'est ce qui a été fait, et aujourd'hui l'ensemble de la machine motrice et de la machine électrique forme un tout absolument homogène, auquel doivent collaborer, sans s'ignorer l'un l'autre, l'ingénieur-mécanicien et l'ingénieur-électricien : ce sont les groupes électrogènes de nos usines modernes.

Les dynamos à courant continu et les alternateurs se sont développés à peu près parallèlement, au moins au point de vue de la per-

fection et de l'économie de leur construction ; mais, au point de vue de l'importance et du nombre des machines construites, les premières sont aujourd'hui bien dépassées par les seconds, à cause de la grande facilité avec laquelle le courant alternatif se prête à la production et à la transformation des hautes tensions. L'uniformité de types a succédé à la variété d'autrefois, et les machines d'aujourd'hui sont en général caractérisées par une symétrie parfaite autour de l'axe.

Pour la dynamo à courant continu, la forme multipolaire, avec couronne de pôles inducteurs extérieure et fixe, armature induite intérieure et mobile, est aujourd'hui absolument générale. L'armature est constituée par un cylindre rainuré suivant ses génératrices ; les conducteurs induits, solidement encastrés dans ces rainures, ne craignent plus ni les efforts radiaux de la force centrifuge, ni les efforts tangentiels des forces électromagnétiques ; l'entrefer, cette cause de grande dépense dans l'excitation des machines, est réduit à son minimum entre les surfaces, soigneusement tournées et alésées, de l'armature et des pièces polaires.

La raison d'économie de matière, de plus en plus impérieuse dans la construction moderne, conduit à dissiper les énergies perdues (hystérésis, effet Joule, courants de Foucault), dans des volumes de plus en plus restreints ; il en résulterait, si l'on ne prenait pas de précautions spéciales, des élévations de température excessives, que l'on évite par une étude attentive de la ventilation des induits ; de nombreux canaux de ventilation sont judicieusement ménagés dans la masse de la partie tournante, qui constitue ainsi un véritable ventilateur ; quelquefois même un ventilateur spécial envoie un puissant courant d'air dans la machine.

La commutation sans étincelles sous les balais, cette pierre d'achoppement qui a si longtemps arrêté les premiers inventeurs de la dynamo, continue, malgré tous les progrès faits dans cette voie, à faire l'objet de nombreuses études : si l'on réfléchit que, au moment du passage sous un balai, le courant doit se renverser dans une section en un temps qui est de l'ordre du 500e de seconde, on comprendra, malgré l'apparence paradoxale que peut avoir cet énoncé, que les phénomènes de self-induction ont une importance plus grande dans les machines à courant continu que dans les machines à courants alternatifs ; des tensions extrêmement élevées, auxquelles on a donné le nom de tensions de réactance, se développent ainsi et se

manifestent, si l'on n'y porte pas remède, par des étincelles destructives aux balais : les artifices généraux que l'on emploie pour les éviter consistent soit à diminuer, soit à équilibrer autant que possible ces tensions par d'autres convenablement choisies ; je ne ferai que rappeler pour mémoire l'ancienne méthode, qui n'était qu'un pis aller, et qui consistait à décaler les balais dans le sens du mouvement ; parmi les artifices plus modernes, je me bornerai à citer celui des pôles supplémentaires parcourus par le courant total de la machine et situés sur les lignes neutres ; celui des cornes polaires dissymétriques à l'entrée et à la sortie ; celui enfin de modes d'enroulements plus ou moins compliqués de l'induit, qui peuvent présenter certains avantages au point de vue de la diminution de la tension de réactance. Quoi qu'il en soit, on comprend l'importance des études expérimentales qui ont pour objet la détermination de la forme, en fonction du temps, du courant variable qui circule, pendant la commutation, dans chaque section d'une dynamo à courant continu ; ces études deviennent de délicates expériences de laboratoire, à cause de la petitesse de l'intervalle de temps mis en jeu.

L'alternateur moderne semble, lui aussi, avoir pris sa forme définitive : il se compose, à l'inverse de la dynamo à courant continu, d'une couronne d'induit, extérieure et fixe, et d'une roue, portant les pôles inducteurs, intérieure et mobile. Le nombre de ces pôles, qui dépasse rarement 12 ou 14 dans la machine à courant continu, atteint souvent 80 et plus dans les alternateurs ; ce grand nombre est nécessaire pour produire, avec des marches lentes, les fréquences 25 ou 50 usitées dans la pratique.

Le choix de l'induit comme partie fixe des grands alternateurs s'impose pour deux raisons très simples : d'abord il est plus facile d'isoler, pour de très hautes tensions, des parties fixes que des parties mobiles soumises à la force centrifuge ; et ensuite le grand moment d'inertie des inducteurs convient bien pour constituer un volant de la machine motrice. On construit ainsi, à l'heure actuelle, des alternateurs pouvant produire directement 10.000 à 12.000 volts.

Pourquoi cette disposition si logique ne s'étend-elle pas aux machines à courant continu ? Uniquement parce que, dans ces machines, les balais sont solidaires de l'inducteur, et que, par suite, si on rendait celui-ci mobile, il faudrait faire aussi tourner ceux-là, ce qu'on ne s'est pas encore résigné à faire, au moins pour les génératrices ; si on ajoute à cela que le collecteur des dynamos à courant

continu est toujours une pièce délicate et dont il est difficile d'isoler convenablement les lames consécutives, on reconnaîtra sans peine que les alternateurs se prêtent mieux que les dynamos à la production directe des hautes tensions.

Comme dans la machine à courant continu, le circuit induit des alternateurs se compose de barres logées dans des rainures pratiquées suivant les génératrices de l'armature. Il comporte un, deux ou trois enroulements, suivant qu'il s'agit d'un induit mono, di ou triphasé.

Les formes des machines paraissaient à peu près définitivement fixées lorsque l'apparition des turbines à vapeur vint tout modifier : la grande vitesse à laquelle doivent tourner ces moteurs impose des formes nouvelles pour les machines électriques ; pas un instant, en effet, il ne vint à l'idée de renoncer aux avantages si précieux des groupes électrogènes et de commander par courroie ou par engrenage les anciennes machines à marche lente.

Ici encore, comme précédemment, nous aurons surtout en vue les alternateurs, bien que dès maintenant on construise également des groupes : turbine à vapeur, dynamo à courant continu.

Tout d'abord nous remarquerons que les grandes vitesses exigées par les turbines entraînent pour les alternateurs un faible nombre de pôles : la relation entre la vitesse angulaire, exprimée en tours par minute, et le nombre des pôles, pour une fréquence donnée, est représentée par une hyperbole (*fig.* 1) : on voit, par exemple, que, pour la fréquence 25, la vitesse de la machine doit être de 1.500 tours par minute si l'alternateur est bipolaire et de 750 s'il est à 4 pôles : il résulte de là qu'aux grandes vitesses on a très peu de choix pour la vitesse et pour le nombre de pôles ; les machines lentes, au contraire, sont beaucoup plus souples et permettent une grande indétermination dans le choix des vitesses et du nombre de pôles : la *fig.* 1 le montre clairement. C'est là une difficulté sérieuse dans la construction des turbo-alternateurs.

En fait, les turbines sont construites en général pour 3.000 ou 1.500 tours par minute, quelquefois 750 ou 500.

A ces grandes vitesses, on ne pouvait plus songer aux inducteurs volants de grand diamètre : il fallut donc, bon gré mal gré, réduire ce diamètre, et revenir aux faibles diamètres d'autrefois ; mais, comme on prétendait garder le terrain conquis dans l'élévation des puissances et construire des turbo-alternateurs de 5.000 kilowatts et

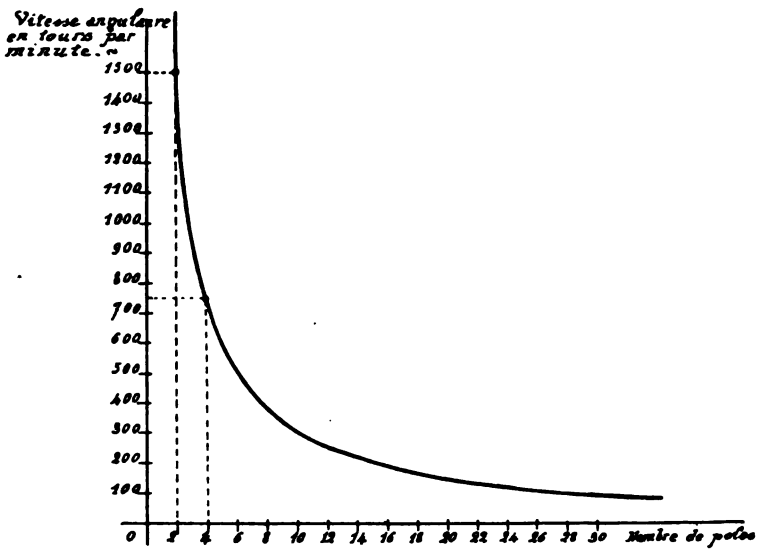

FIG. 1. — Relation entre le nombre de pôles, et la vitesse angulaire d'un alternateur devant donner la fréquence 25.

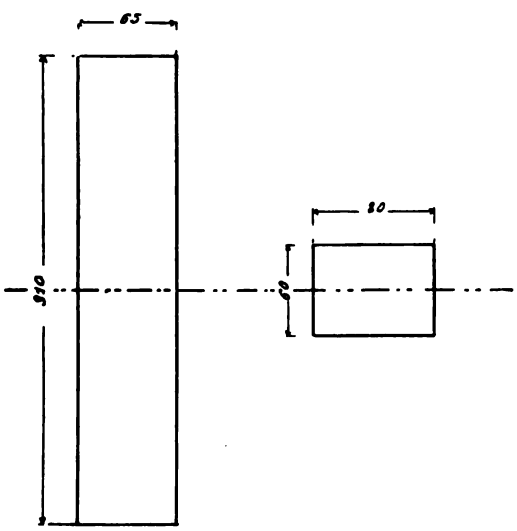

FIG. 2. — Dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur de même puissance (350 kilowatts) et de même tension (2.000 volts) ; vitesses respectives : 142 et 3.000 tours par minute.

plus, deux moyens seuls restaient disponibles : allonger la machine parallèlement à l'axe, et, si cela ne suffisait pas, élever, grâce à des perfectionnements de la construction mécanique, la force centrifuge tolérée à la périphérie de la partie tournante.

L'un et l'autre procédé ont été employés : en effet, si nous comparons (*fig.* 2) les dimensions analogues des inducteurs tournants de deux alternateurs triphasés de 350 kilowatts, 2.000 volts entre bornes, mus l'un par turbine à 3.000 tours par minute, l'autre par machine à vapeur à 142 tours par minute, nous voyons : 1° que la dimension parallèle à l'axe s'est allongée dans le turbo-alternateur de 65 à 80 ; 2° que le diamètre s'est réduit dans une proportion plus grande de 310 à 60 ; 3° comme conséquence, que la force centrifuge est

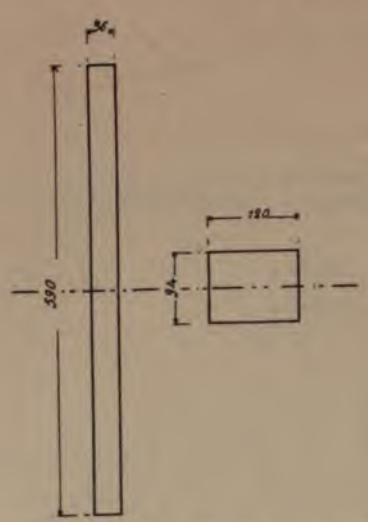

Fig. 3. — Dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur de même puissance (2.000 kilowatts) et de même tension (5.000 volts) ; vitesses respectives : 70 et 1.500 tours par minute.

beaucoup plus grande dans le premier que dans le second. Un calcul facile montre que, dans le premier, la force centrifuge est de 2.500 grammes-force par gramme-masse à la périphérie avec une vitesse de 80 mètres par seconde, tandis que, dans le second, elle est seulement de 40 grammes-force par gramme-masse à la périphérie avec une vitesse de 24 mètres par seconde. La *fig.* 3 permet la même comparaison pour deux autres alternateurs.

On conçoit aisément que, dans ces conditions, une augmentation de puissance des turbo-alternateurs ne peut plus guère être recherchée dans une augmentation de vitesse, et que le seul moyen qui reste disponible est un accroissement des dimensions parallèlement à l'axe : nous trouvons ainsi que deux alternateurs de 5.000 volts à 1.500 tours par minute, l'un de 480 kilowatts, l'autre de 2.000 kilowatts, ont à peu près le même diamètre (95 centimètres environ), mais ont des longueurs respectives de 46 et 120 centimètres (*fig.* 4).

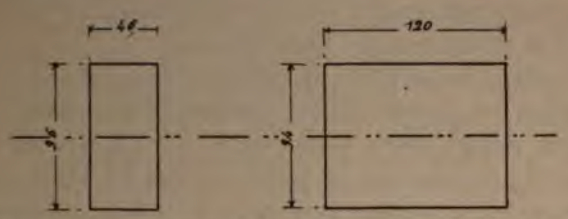

Fig. 4. — Dimensions comparées des parties tournantes de deux turbo-alternateurs, l'un de 480 kilowatts, l'autre de 2.000 kilowatts (5.000 volts, 1.500 tours par minute).

Ces efforts excessifs, devant lesquels on aurait reculé dans la construction ancienne, ont conduit à des formes toutes nouvelles pour les inducteurs tournants ; il n'y a plus de pôle saillant ; l'âme de l'inducteur est un cylindre rainuré suivant les génératrices ; les conducteurs, parcourus par un courant continu, qui font de cet inducteur un puissant électro-aimant, sont logés dans les rainures et maintenus en place par des coins très résistants et solidement encastrés ; les portions de fils extérieures aux rainures sont enroulées sur une portion lisse du cylindre et maintenues en place par des frettes métalliques solides ; si l'on réfléchit que ces frettes peuvent subir des efforts de 30 kilogrammes par millimètre carré et, d'autre part, n'être pas magnétiques pour éviter des dérivations magnétiques nuisibles, on reconnaîtra que le problème n'était pas facile à résoudre : les aciers au nickel, si bien étudiés par notre confrère, M. Guillaume, ont seuls permis d'y arriver.

Ces difficultés ne sont pas les seules ; un équilibrage parfait des parties tournantes est nécessaire, à ces grandes vitesses, tant au point de vue statique (centre de gravité sur l'axe) qu'au point de vue dynamique (coïncidence des axes de symétrie et d'inertie) : quiconque assiste, dans les ateliers de construction, à ces opérations

d'équilibrage, croit retrouver, pour ces puissantes machines, les délicates méthodes de nos laboratoires de physique.

Tous ces obstacles, et bien d'autres encore, ont été surmontés, et dès maintenant le turbo-alternateur semble être la grande machine de l'avenir.

II

Trois grands problèmes préoccupent actuellement les électriciens au sujet des alternateurs; ce sont : 1° le couplage; 2° le compoundage, et 3° la destruction des harmoniques.

1° Le couplage en parallèle des alternateurs s'est imposé dès que l'on a réalisé des grandes usines composées de plusieurs groupes électrogènes devant entrer successivement en fonction suivant les demandes de puissance sur le réseau; toutes les machines devant avoir exactement la même fréquence, leur isochronisme rigoureux s'impose, d'où une difficulté toute nouvelle que ne connaissaient pas les dynamos à courant continu.

Les propriétés mêmes des courants alternatifs, heureusement, apportent une solution à un problème que des régulateurs de vitesse purement mécaniques auraient été incapables de résoudre : en effet, si une machine tend à se mettre en avance sur les autres, la puissance qu'elle doit fournir augmente et la fait ralentir; sa marche a donc tous les caractères d'un équilibre stable; l'équilibre, troublé un instant par une cause accidentelle quelconque, se rétablit par une série d'oscillations dont la période dépend uniquement du moment d'inertie et des constantes électriques de l'alternateur; la loi de ces oscillations est celle du mouvement pendulaire, et leur période est par conséquent proportionnelle à la racine carrée du moment d'inertie et en raison inverse de la racine carrée du couple développé par un écart angulaire égal à l'unité.

Lorsque l'alternateur est conduit par une machine à vapeur à piston, le couple moteur lui-même est périodique, et la marche de la machine sera d'autant plus stable que sa période d'oscillation propre et la période du couple moteur seront plus différentes; au contraire, si ces périodes coïncident ou sont voisines, les oscillations s'amplifieront, et bientôt l'alternateur tombera hors de phase, accident qui peut être des plus graves, le réseau se trouvant en court-circuit sur l'alternateur *décroché*. On reconnaît là la théorie ordinaire

de la résonance, qui joue un si grand rôle dans toutes les parties de la physique.

Il est essentiel non seulement d'éviter autant que possible des oscillations, mais de les amortir rapidement dès qu'elles tendent à se produire; c'est là le rôle des circuits amortisseurs de M. Leblanc, qui consistent en une série de barres de cuivre traversant de part en part les pôles inducteurs, et mises en court-circuit de part et d'autre de la machine par deux cercles également en cuivre. Ce système joue exactement le rôle du cadre d'aluminium qui, dans certains modèles, amortissait les oscillations du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

L'étude des conditions du maintien rigoureux de l'isochronisme des alternateurs couplés a conduit à une conclusion paradoxale; c'est que les régulateurs de vitesse des machines motrices devaient ne pas être trop sensibles; certains auteurs même ont été jusqu'à dire : devaient être supprimés, sauf un seul. On conçoit en effet que si, lorsqu'une avance d'un des alternateurs se produit, la machine motrice a un régulateur assez sensible pour s'accommoder immédiatement au supplément de puissance exigé par cette avance, le mécanisme purement électrique du maintien de l'isochronisme, que nous avons décrit plus haut, ne pourra se produire, et l'écart angulaire de l'alternateur ira en s'exagérant de plus en plus.

2° Le compoundage des machines électriques est un problème déjà ancien, puisque Marcel Deprez en a donné une solution bien connue, pour la dynamo à courant continu, dès 1881. Ce problème consiste, comme on le sait, à maintenir automatiquement la tension constante aux bornes d'une machine, quels que soient les incidents qui se produisent sur le réseau qu'elle alimente. Or, ce problème est beaucoup plus difficile à résoudre pour les alternateurs que pour les machines à courant continu ; dans les alternateurs, en effet, la chute de tension aux bornes, pour une excitation donnée, dépend de deux variables, le débit et la différence de phase entre le courant et la tension, tandis que, pour les machines à courant continu, elle ne dépend que d'une variable, qui est le débit.

Si le compoundage avait uniquement pour but d'éviter un réglage à la main pour le remplacer par un réglage automatique, il serait déjà important, mais ne le serait que dans des cas particuliers.

Mais ce qui fait la véritable importance du compoundage des machines et en particulier des alternateurs, c'est qu'il permet une économie sensible sur leur construction.

Ce point de vue n'est pas évident, et mérite d'arrêter quelques instants notre attention : prenons un alternateur ordinaire, à faible chute de tension ; en augmentant la profondeur des rainures de l'induit, nous pouvons y loger plus de fils ; en diminuant l'entrefer, nous pouvons augmenter, pour une même excitation, le flux utile ; toutes ces modifications augmentent, sans dépense de matière, la tension de la machine, et par suite sa puissance ; mais elles augmentent aussi la réaction de l'induit, de sorte que, pour maintenir constante la tension entre la marche en charge et la marche à vide, la gamme des variations du courant inducteur doit être telle que le réglage à la main devient impossible ; c'est ici qu'intervient l'utilité du compoundage ; des solutions purement électriques du problème ont été données dans ces dernières années par MM. Maurice Leblanc, Boucherot, Blondel ; des solutions électromécaniques, c'est-à-dire faisant entrer en jeu simultanément le réglage de l'excitation et celui de la machine motrice, par M. Routin et M. Picou.

Le système de M. Boucherot, qui paraît le plus répandu à l'heure actuelle, consiste dans l'emploi sur chaque phase de deux transformateurs, l'un dont le primaire est en dérivation sur les bornes de l'alternateur, l'autre dont le primaire est en série avec le circuit général. Les secondaires de ces transformateurs, convenablement calculés, sont en série, et les forces électromotrices ainsi obtenues sont utilisées à produire un champ tournant dans l'entrefer d'une machine spéciale qui servira d'excitatrice. Dans ce champ tourne, avec une vitesse différente, un induit à collecteur monté sur l'axe même de l'alternateur ; grâce à un enroulement spécial de cet induit, on s'arrange pour que les pôles électriques restent fixes sur le collecteur, comme dans les machines à courant continu ordinaires ; des balais placés en ces points recueillent donc un courant continu qui sert à l'excitation de l'alternateur principal et dont l'intensité se règle automatiquement pour maintenir constante la tension aux bornes.

3° Les forces électromotrices produites par les alternateurs ne sont pas rigoureusement sinusoïdales ; comme toute fonction périodique du temps, elles peuvent être considérées comme la superposition d'un terme fondamental, le plus important de tous, et d'une série d'harmoniques de périodes sous-multiples de la période principale ; ces harmoniques sont dus à deux causes : en premier lieu, aux formes respectives des pièces polaires et des bobines induites ; en second lieu, à la présence sur l'armature des rainures et des dents

qui produisent des fluctuations du flux et, par suite, de la force électromotrice ; on peut prévoir sinon la grandeur, au moins l'ordre de ces derniers : par exemple, un alternateur triphasé à une rainure par pôle et par phase donne surtout les harmoniques qui ont 5 fois et 7 fois la fréquence du terme fondamental ; de même, pour 2 rainures par pôle et par phase, il donne les harmoniques 11 et 13, et enfin, pour 3 rainures par pôle et par phase, les harmoniques 17 et 19, et ainsi de suite.

La production de ces harmoniques est à tous les points de vue nuisible, et l'on voudrait à tout prix se rapprocher d'une courbe sinusoïdale ; de nombreuses tentatives ont été faites dans ce sens : on a taillé d'une manière plus ou moins empirique les bords des pièces polaires ; on a incliné les rainures sur les génératrices du cylindre d'armature ; on a proposé de composer l'induit de deux moitiés légèrement décalées l'une par rapport à l'autre ; tous ces moyens ont donné de bons résultats ; mais ce n'est que tout récemment que M. Maurice Leblanc s'est attaqué directement au problème et a présenté ce qu'il a appelé énergiquement : un étouffeur d'harmoniques. Ce système, fondé sur un principe analogue à celui de l'amortisseur, et qui n'est autre chose qu'un amortisseur de grande résistance, est encore trop nouveau pour qu'on puisse porter un jugement sur lui.

III

Les diverses génératrices électriques étant ainsi décrites, voyons la place qu'elles tiennent dans les stations centrales modernes.

Les moteurs qui les conduisent peuvent être hydrauliques, à vapeur ou à gaz.

Nous n'avons pas à rappeler ici l'importance des installations hydro-électriques : on évalue à plus de 500.000 chevaux la puissance ainsi utilisée en France. Basses chutes à grand débit, hautes chutes à faible débit, voilà les deux extrêmes entre lesquels se placent toutes les grandes usines existantes. Comme exemple des premières, nous citerons l'usine des forces motrices du Rhône, à Jonages, près de Lyon, qui produit 12.000 chevaux avec une chute de 11 mètres et des alternateurs à marche lente de 120 tours par minute ; comme exemple des secondes, l'usine de Vouvry, près du lac de Genève, qui utilise une chute de 1.000 mètres de hauteur, avec des alterna-

teurs de 2.000 kilowatts à grande vitesse, à induit tournant, qui font 1.000 tours par minute.

L'installation hydro-électrique la plus grandiose à l'heure actuelle est celle du Niagara, où l'on trouve à la fois un débit colossal et une hauteur déjà très notable (40 mètres environ). Cette installation se partage entre 5 compagnies qui peuvent disposer de 750.000 chevaux, sur lesquels 155.000 seulement étaient installés en octobre 1904, et 115.000 vendus ; le capital immobilisé par ces cinq compagnies est de 132.500.000 francs.

Dans les installations mues par la vapeur, l'ancienne machine à piston est encore loin d'être détrônée par la turbine : la double et triple expansion, la surchauffe, les économiseurs, l'augmentation de la puissance des unités ont abaissé la consommation à 5 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

Comme exemple d'une des plus importantes stations à vapeur du monde, nous citerons celle du métropolitain de New-York, qui alimente 800 trains circulant sur un réseau souterrain de 24 kilomètres environ. Cette station comprend 9 groupes électrogènes de 8.000 chevaux chacun. Les machines à vapeur sont à double expansion, avec cette disposition particulière que les cylindres à haute pression sont horizontaux et les cylindres à basse pression verticaux, la course des pistons étant la même pour chacun d'eux.

Le caractère d'homogénéité que nous avons reconnu dans les groupes électrogènes se retrouve dans l'ensemble des grandes usines à vapeur telles que celle dont nous parlons maintenant ; la manipulation du charbon et des cendres prend un caractère tout à fait scientifique : le charbon est élevé, par des wagonnets se mouvant sur plan incliné, jusqu'au faîte du bâtiment où, suivant un usage très répandu maintenant, se trouvent les soutes à charbon, en sorte que, ce premier travail effectué, c'est la pesanteur seule qui conduira le charbon des soutes aux foyers des chaudières, puis les cendres des foyers aux wagonnets destinés à les enlever ; le chargement des chaudières se fait d'une manière tout à fait automatique, et les chauffeurs sont entièrement supprimés ; partout la main-d'œuvre est réduite à sa plus simple expression ; toute la manœuvre des wagonnets se fait par traction électrique et moteurs à courants alternatifs ; ce système est capable d'élever 200 tonnes de charbon par heure, ce qui est beaucoup plus que suffisant, puisqu'on peut admettre en nombre rond que, à pleine charge, une usine de 80.000 chevaux,

comme celle-ci, brûle 80 tonnes de charbon par heure. Une remarquable installation du même genre est à citer au Métropolitain de Paris.

Nous avons déjà attiré l'attention sur l'importance tous les jours plus grande que prennent les groupes électrogènes mus par turbine à vapeur : la turbine de Laval, qu'on ne peut se dispenser de citer ici [1], la turbine Parsons, la première qui ait réalisé de grandes puissances avec des marches relativement lentes, la turbine Rateau en France, la turbine Curtis en Amérique, sont les plus connues.

Malgré l'inconvénient de leur grande vitesse, les turbines ont tellement d'avantages que leur usage se répand de jour en jour ; cela est si vrai que la Commission chargée de l'étude du régime futur de l'électricité à Paris n'a pas hésité un instant à recommander, pour une installation qui atteindra 80.000 kilowatts, l'usage de turbo-alternateurs de 5.000 kilowatts chacun. Il est curieux de constater que l'on retrouve aujourd'hui, sous ces formes puissantes, le principe qu'Héron d'Alexandrie avait utilisé il y a plus de vingt siècles dans une machine qui n'était qu'un jouet.

Le principal avantage des turbines, qu'elles doivent précisément à leur grande vitesse, est le moindre encombrement : un groupe de 3.200 kilowatts pèse 20 tonnes, dont 9 pour la turbine et 11 pour l'alternateur ; le même groupe, avec une machine à piston, pèserait 400 tonnes ; — le premier a un encombrement horizontal de 16 mètres de long sur $3^{m},50$ de large, soit 56 mètres carrés ; le second occuperait environ 280 mètres carrés, c'est-à-dire 5 fois plus. La turbine Curtis, dont l'axe est vertical, a un encombrement horizontal encore plus réduit, 7 0/0 de celui d'une machine à vapeur de même puissance.

Les turbines comportent encore de nombreux avantages : la circulation uniforme de la vapeur toujours dans le même sens laisse chaque point à la même température, et par suite évite les condensations et vaporisations successives si nuisibles dans la machine à vapeur ; la régularité de la vitesse et l'absence de tout couple périodique sont, comme nous l'avons vu, des avantages précieux au point de vue du couplage des alternateurs ; l'absence de matières lubréfiantes dans les parties en contact avec la vapeur permet une surchauffe plus considérable que dans les machines à vapeur ordinaires, où les huiles

---

[1] Voir *Bulletin de la Société de Physique*, 1894, p. 147.

sont détruites par une surchauffe trop élevée et où l'on ne peut guère dépasser 250°, tandis qu'on va jusqu'à 300° dans les turbines; l'eau de condensation qui n'est pas souillée par des matières grasses peut immédiatement servir à l'alimentation de la chaudière. Grâce à toutes ces qualités, la consommation de vapeur s'est abaissée aujourd'hui à moins de 5 kilogrammes de vapeur par cheval-heure, c'est-à-dire est devenue comparable à celle des meilleures machines à vapeur.

L'inconvénient le plus grave est la nécessité d'une condensation extrêmement parfaite : on atteint aujourd'hui couramment des vides de quelques centimètres de mercure, le rendement de la turbine baissant extrêmement vite avec un mauvais vide au condenseur (1). ceci exige une alimentation en eau très abondante et telle qu'on ne la peut trouver, pour de grandes installations, qu'au bord d'un fleuve ou d'une rivière; un autre inconvénient est la difficulté de construire des groupes de faible puissance, non au point de vue de la turbine, qui, au contraire, se prête très bien à ces faibles puissances, mais au point de vue de l'alternateur et surtout de la dynamo à courant continu.

Un usage extrêmement intéressant des turbines à basse pression a été fait par M. Rateau pour utiliser les vapeurs d'échappement des machines à vapeur ordinaires sans condensation; ces vapeurs s'écoulent d'une manière intermittente à chaque coup de piston; grâce à un appareil extrêmement ingénieux, qu'il nomme un accumulateur de chaleur, dont la capacité calorifique emmagasine, puis restitue de la chaleur, M. Rateau transforme cet écoulement intermittent en écoulement continu propre à alimenter une turbine : c'est ainsi qu'aux mines de Bruay la vapeur d'échappement d'une machine d'extraction, à $0^{kg},9$ par centimètre carré, est détendue par l'intermédiaire d'un accumulateur de chaleur, d'une turbine à basse pression et d'un condensateur jusqu'à la pression de $0^{kg},15$ par centimètre carré. La turbine actionne deux dynamos à courant continu dont l'énergie, aux frais d'installation près, est absolument gratuite, puisqu'elle utilise des vapeurs qui auparavant se perdaient librement dans l'atmosphère. Si l'on réfléchit que, dans les mines par exemple,

(1) Un kilogramme de vapeur se détendant depuis la pression de 10 kilogrammes par centimètre carré jusqu'à la pression atmosphérique normale donne théoriquement 39.000 kilogrammètres; se détendant jusqu'à une pression de $0^{kg},206$ par centimètre carré, il donne 59.000 kilogrammètres, et jusqu'à une pression de $0^{kg},070$ par centimètre carré, 73.000 kilogrammètres.

certaines machines d'extraction consomment en moyenne 5.000 à 6.000 kilogrammes de vapeur par heure ; que, dans les aciéries, certains laminoirs consomment jusqu'à 20.000 kilogrammes de vapeur par heure, et que ces machines marchent souvent sans condensation, on verra que, par l'application des turbines à basse pression et d'une condensation aussi parfaite que possible, on pourra gagner de 600 à 700 chevaux dans le premier cas, et près de 2.000 dans le second [1], qu'on pourra utiliser et transporter sous forme électrique.

La dernière source motrice que nous avons à examiner est le moteur à gaz : réduit pendant bien longtemps à la production des petites puissances, il s'est développé depuis quelques années avec une rapidité extraordinaire ; on peut voir aujourd'hui des moteurs à gaz à quatre cylindres en double tandem, à double effet, de 6.000 chevaux, ayant un rendement thermique (rapport entre la puissance utilisée et la puissance contenue dans la houille) de 38 0/0.

Il va sans dire que ces puissantes machines n'utilisent pas le gaz de ville ; elles utilisent uniquement le gaz pauvre (et dans ce cas la consommation s'abaisse à 450 grammes de houille par cheval-heure) ou les gaz perdus provenant des hauts fourneaux ; cette dernière application surtout semble prendre actuellement un développement grandiose : un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour donne environ 16.000 mètres cubes de gaz par heure, qui peuvent produire une puissance d'au moins 2.000 chevaux ; dans ces conditions, le kilowatt-an reviendrait à 100 ou 120 francs (intérêt et amortissement compris) : on évalue à 600.000 chevaux la puissance ainsi perdue en Allemagne pour une production de 8.000.000 de tonnes de fonte ; on peut dire que, lorsque toute cette puissance sera utilisée, — et elle ne peut l'être que sous la forme électrique, — la production de la fonte deviendra l'accessoire et celle de l'énergie la principale dans les pays de hauts fourneaux.

IV

L'énergie électrique étant produite par un des procédés que nous venons d'étudier, il s'agit de la transporter ; les distances de transport augmentent tous les jours : San-Francisco utilise pour ses

---

[1] Voir P. Chaleil, *l'Utilisation des vapeurs d'échappement* (*Revue générale des Sciences*, t. XV, p. 1041).

tramways l'énergie produite par les chutes de l'Ubax, à une distance de 355 kilomètres.

Le système le plus généralement employé est celui des courants triphasés à haute tension : l'énergie est produite au moyen de groupes électrogènes de 1.000 à 7.000 kilowatts, directement jusqu'à 10.000 ou 12.000 volts environ, par transformation jusqu'à 25.000 volts, et souvent par double transformation au-dessus de 25.000 volts.

La tension la plus élevée en France est de 28.000 volts (réseau de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen), en Europe de 40.000 volts (Transport de Gromo à Membro dans le Nord de l'Italie), en Amérique de 50.000 volts (Missouri River Power C°).

En général les lignes employées pour les très grandes distances sont aériennes, en cuivre, ou quelquefois en aluminium ; les hautes tensions que nous venons de signaler amènent à employer des isolateurs à plusieurs cloches et de très grandes dimensions pour éviter les décharges disruptives : ceux de la Missouri River ont 22 centimètres de diamètre et 13 centimètres de hauteur. Pour la même raison, et pour éviter les effluves entre fils, les conducteurs doivent être écartés les uns des autres ; dans la même installation, les trois fils de la ligne triphasée occupent les trois sommets d'un triangle équilatéral de 2 mètres de côté.

Les lignes souterraines, dont on peut évaluer le prix à trois fois celui des lignes aériennes, sont beaucoup moins répandues ; cependant on sait aujourd'hui construire des câbles qui, aux essais, résistent à une tension de 100.000 volts ; des théories nouvelles et fort simples ont montré que, dans un câble, toute la masse de l'isolant ne travaille pas à la même tension, et que c'est dans le voisinage immédiat du conducteur que le gradient du potentiel est le plus élevé [1] ; ce sont donc les régions où il faut surtout employer des isolants à grande rigidité électrostatique. La plus longue ligne souterraine (comme transport) qui existe en France est une ligne de 13 kilomètres à 10.000 volts sur le réseau de la Méditerranée ; des câbles à 26.000 volts sont en service à Toulon. Les lignes aériennes ont, par rapport aux lignes souterraines, le grave inconvénient d'être exposées aux accidents dus à l'électricité atmosphérique. Les coups de foudre directs sont rares, et les électriciens, à l'heure actuelle,

[1] Un câble armé, construit pour supporter 25.000 volts, avec 14mm,5 d'épaisseur d'isolant, supporte 5.000 volts par millimètre dans le voisinage du conducteur, et seulement 2.270 volts par millimètre dans le voisinage de l'enveloppe.

semblent craindre surtout les élévations de tension causées indirectement soit par des phénomènes d'influence électrostatique, soit par des phénomènes d'induction provoqués par les décharges oscillantes dues aux coups de foudre voisins. Il semble que, tant que l'isolement des lignes était médiocre, comme c'était le cas pour les lignes à basse tension, les élévations anormales de tension ne se produisaient pas, l'équilibre ayant le temps de s'établir suffisamment par la faible conductibilité des supports. Mais, à mesure que l'isolement est plus soigné, les hautes tensions dues aux phénomènes atmosphériques peuvent se développer sans se dissiper au fur et à mesure, et alors elles cherchent un point faible où elles provoquent des désordres importants. La question des parafoudres, destinés à intervenir en cas de décharge brusque, et des limiteurs de tension, destinés, par des fuites volontairement établies, à empêcher toute élévation de tension, est donc devenue capitale dans les transmissions à longue distance.

Mais, qu'il s'agisse de câbles souterrains ou de lignes aériennes, d'autres élévations de tension sont à craindre : ce sont celles qui sont dues soit à la résonance inattendue d'un harmonique de la tension principale dont la période se trouve coïncider avec celle des oscillations propres de la ligne, soit à la rupture brusque d'un court-circuit qui provoque ce que l'on appelait autrefois un extra-courant de rupture, extra-courant dont le calcul est fort compliqué si on veut tenir compte de toutes les circonstances qui interviennent. Aussi les parafoudres et les limiteurs de tension sont-ils aujourd'hui considérés et étudiés comme des appareils de protection contre toutes les élévations anormales de tension, que ces élévations soient d'origine atmosphérique ou autre.

Les appareils accessoires dans ces grandes lignes de transmission prennent une grande importance : c'est ainsi que les interrupteurs deviennent de véritables machines ; la rupture de l'arc dans l'air entraînerait à des dimensions tout à fait excessives ; aussi, l'usage est-il très généralement répandu aujourd'hui de rompre ces arcs dans l'huile. Nous citerons ici un interrupteur triphasé, à huile, capable d'interrompre une puissance de 750 kilowatts sous 30.000 volts. Les disjoncteurs du Métropolitain de New-York, qui peuvent couper 5.000 kilowatts sous 11.000 volts, sont d'un type analogue.

En général, le courant triphasé à haute tension n'est pas utilisé

tel quel à la station d'arrivée ; il est soit transformé en courant triphasé à tension moindre, soit même transformé en courant continu à basse ou moyenne tension par commutatrices ou par des groupes moteurs-générateurs.

Parallèlement au système de transmission par courants triphasés à haute tension, se développait sur un champ d'action plus restreint le très intéressant système série à intensité constante par courants continus à haute tension. Ce système, auquel s'attache invinciblement le nom de M. Thury, consiste à placer en série, sur un même circuit, toutes les génératrices d'une part, toutes les réceptrices de l'autre, et à faire varier, suivant la demande de puissance, non pas l'intensité du courant, qui reste constante à toute charge, mais la tension de la station génératrice.

Le plus récent exemple et le plus beau d'un transport par courant continu série est celui de Saint-Maurice-Lausanne, sur une distance de 56 kilomètres ; le courant est constant et maintenu, quelle que soit la demandede puissance, à 150 ampères. La tension, au contraire, peut varier de 0 à 23.000 volts. A l'arrivée, le courant principal met en mouvement des groupes moteurs-générateurs, de manière à transformer le système intensité constante, qui se prête bien aux longues transmissions, en système à potentiel constant, qui se prête bien aux distributions urbaines. Parmi ces groupes, les uns donnent du courant continu à 500 volts pour les tramways, les autres du courant triphasé à 110 volts pour l'éclairage. Il est assez curieux de rencontrer ici un système où l'énergie est *transportée* sous forme de courant continu et *distribuée* sous forme de courants triphasés.

Tout récemment, un grand transport par le système du courant continu série vient d'être décidé entre Moutiers et Lyon, à une distance de 180 kilomètres ; la tension atteindra 57.600 volts, et l'intensité constante sera de 75 ampères, ce qui correspond à une puissance maxima de 4.320 kilowatts.

V

Parmi les diverses formes sous lesquelles peut être utilisée l'énergie électrique, la plus importante est la forme mécanique. Les moteurs à courant continu, les moteurs synchrones ou asynchrones à courants alternatifs polyphasés sont classiques aujourd'hui. Le seul

problème qui restait à résoudre jusqu'à ces derniers temps était celui du moteur monophasé ; on possédait bien, il est vrai, le moteur asynchrone monophasé ; mais ce moteur démarre mal et par des artifices compliqués ; c'est surtout à ce point de vue d'un puissant couple de démarrage que se sont placés les inventeurs récents, et en particulier l'un des plus distingués de nos anciens élèves de l'École supérieure d'Électricité, M. Marius Latour. Ces nouveaux moteurs, dont l'avenir semble considérable pour la traction électrique, sont fondés sur l'artifice du collecteur étendu aux courants alternatifs. Tout le monde sait que, si l'on envoie un courant alternatif dans un moteur ordinaire à courant continu excité en série, ce moteur se met à tourner : cela tient à l'une des lois fondamentales d'Ampère, à savoir que le sens des actions qui s'exerce entre deux circuits ne change pas si l'on renverse à la fois le courant dans l'un et l'autre de ces deux circuits. Mais un moteur simple, ainsi constitué, a des inconvénients graves : en premier lieu, les courants induits dans les noyaux massifs des inducteurs (courants de Foucault) entraînent une perte d'énergie considérable et, par suite, un mauvais rendement : il est facile de remédier à cet inconvénient en substituant aux noyaux massifs des noyaux de tôle feuilletée ; en second lieu, la self-induction considérable de ces moteurs réduit beaucoup la puissance qu'on peut leur demander pour un volume ou un poids donné : parmi les différentes solutions qu'on a données du problème consistant à réduire cette self-induction sans rien sacrifier sur le couple utile, l'une des plus ingénieuses est due à M. Marius Latour : elle consiste à placer, à angle droit avec les balais ordinaires, c'est-à-dire suivant la ligne des pôles, deux autres balais réunis en court-circuit ; la théorie complète de ce moteur est trop délicate pour pouvoir être abordée ici.

Nous n'avons pas à décrire les applications véritablement innombrables qu'ont aujourd'hui les moteurs électriques : application aux ateliers de toute espèce, ateliers mécaniques, ateliers de filature et de tissage, etc. ; application aux appareils de levage, grues, treuils, ponts roulants ; application aux mines (pompes, ventilateurs, tracteurs, etc.), où la plus puissante des machines minières, la machine d'extraction, commence à être commandée électriquement [1]. Mais

---

[1] La machine d'extraction, à marche essentiellement intermittente, et mue jusqu'ici par la vapeur, entraîne des dépenses excessives de vapeur (jusqu'à

l'industrie où les moteurs électriques ont exercé la plus profonde influence est celle de la traction. Nous ne rappellerons que pour mémoire l'immense développement des tramways électriques, dont les réseaux atteignent une longueur de 96.400 kilomètres en Amérique, et nous rechercherons seulement les tendances qui se manifestent actuellement pour la traction des trains lourds sur des lignes interurbaines de grande longueur ; ces tendances peuvent se ramener à deux : la substitution aux trains remorqués par une locomotive de trains constitués par des voitures toutes automotrices, et l'emploi des courants alternatifs à haute tension.

La première disposition a l'avantage de substituer à un moteur unique, qui deviendrait trop puissant et peu maniable, une grande quantité de moteurs plus petits, attaquant directement les essieux de toutes les voitures. L'adhérence utile est ainsi augmentée ; on se débarrasse du poids mort de la locomotive, et le réglage de tous ces moteurs de moyenne puissance est plus facile que celui d'un ou deux moteurs de très grande puissance ; ce réglage s'effectue de la manière suivante : le contrôleur (pour conserver le mot, maintenant passé dans l'usage pour désigner l'appareil de réglage placé sous la main du mécanicien) ne commande plus directement le courant envoyé aux moteurs ; il ne commande que des relais placés sous chaque voiture. Aussi ce contrôleur peut-il être de dimensions très réduites, puisqu'il n'y passe que des courants faibles, et il est curieux de constater que l'appareil de manœuvre des trains lourds à grand nombre de voitures est de dimensions plus restreintes que le contrôleur ordinaire de nos tramways. Les relais dont il a été question opèrent d'ailleurs, sous chaque voiture, les manœuvres ordinaires de réglage, c'est-à-dire, au démarrage, la suppression graduelle des résistances en série, les deux moteurs de chaque voiture étant en série, puis, une fois ces résistances supprimées, la mise en parallèle des deux moteurs avec résistances en série, et enfin, pour les grandes vitesses, la suppression totale des résistances, les deux moteurs étant en parallèle.

La deuxième tendance, qui se manifeste dans la grande traction

49 kilogrammes de vapeur par cheval-heure sur le câble d'extraction). En employant des moteurs électriques, et en emmagasinant l'énergie pendant les périodes de descente, soit dans de lourds volants, soit dans des batteries d'accumulateurs, on annonce des consommations de 18 kilogrammes par cheval-heure ; en fait, dans une installation existante, on a constaté des économies de un tiers sur le combustible employé.

comme dans les transports à grande distance, c'est l'emploi de hautes tensions. Les moteurs de traction, qui sont si exposés aux courts-circuits, ne se prêtent pas à l'utilisation directe de ces hautes tensions : un intermédiaire est indispensable. Dans les systèmes les plus répandus jusqu'ici, cet intermédiaire se trouve dans les sous-stations de transformation. Dans ces sous-stations, l'énergie électrique, amenée sous forme de courants alternatifs à haute tension, est transformée d'abord en courants alternatifs à basse tension par des transformateurs statiques, puis en courant continu, soit par des commutatrices, soit par des groupes moteurs-générateurs, et enfin transmise aux trains en marche par des frotteurs appropriés.

Ces sous-stations sont fort coûteuses, et d'installation et d'entretien : aussi la tendance actuelle est-elle de transmettre directement le courant à haute tension aux trains en marche, de le transformer en courant à basse tension, au moyen de transformateurs statiques placés sur ces trains eux-mêmes, et de l'utiliser sous forme alternative sans le transformer en courant continu : c'est donc la question des moteurs à courants alternatifs qui se pose d'une manière à peu près forcée, à moins qu'on ne redresse le courant alternatif par un commutateur tournant synchrone en évitant les étincelles par des artifices appropriés.

Une qualité qui prime tout dans les moteurs de traction est la possibilité de démarrages puissants et rapides. Or, jusqu'à ces dernières années, les moteurs triphasés pouvaient seuls, en courant alternatif, être agencés de manière à avoir cette propriété que possède à un si haut degré de perfection le moteur série à courant continu. Mais l'emploi du courant triphasé exige au moins deux contacts frottants, en admettant que l'on se serve des rails comme troisième conducteur ; on est donc amené à cette difficulté considérable : établir deux ou trois contacts frottants, à haute tension, entre une ligne fixe et un train à grande vitesse ; comme exemple de la tentative la plus intéressante faite dans ce sens, nous citerons les essais faits en Allemagne sur la ligne Marienfeld-Zossen, de 23 kilomètres de long. Le courant triphasé, à 14.000 volts entre fils, est amené à la voiture par prises de courant à archet. La voiture porte quatre moteurs de 200 kilowatts chacun, pouvant atteindre 600 kilowatts au démarrage ; le courant est transformé, sur la voiture, soit à 1.200 volts (Siemens), soit à 500 volts (A. E. G.) ; on a atteint, sur une voie exceptionnellement bonne et préparée pour cet essai, des vitesses

de 200 kilomètres par heure; à ces vitesses, la pression de l'air à l'avant de la voiture atteint 200 kilogrammes par centimètre carré.

L'inconvénient des deux prises de courant n'est pas le seul des moteurs triphasés; ces moteurs sont d'une construction délicate, à cause du très faible entrefer qu'ils doivent avoir, et de plus ce sont des moteurs à vitesse presque rigoureusement constante. On a essayé, pour faire varier cette vitesse, un grand nombre d'artifices dont voici les principaux : passage de la connexion en étoile à la connexion en triangle des enroulements; montage en cascade de deux moteurs, le rotor du premier, au lieu d'être en court-circuit, étant fermé sur le rotor du second, et le stator de celui-ci en court-circuit; changement du nombre de pôles du moteur par des connexions convenables. Tous ces artifices sont plus ou moins compliqués ou insuffisants, et l'on ne retrouve plus ici la souplesse du courant continu. Aussi espère-t-on beaucoup des nouveaux moteurs à courants alternatifs à collecteur dont nous avons parlé plus haut et qui partagent jusqu'à un certain point les qualités des moteurs à courant continu. Il existe dès maintenant un certain nombre de lignes à traction alternative monophasée à prise de contact unique; la tension est abaissée par un transformateur placé sur la voiture même, et le réglage de vitesse s'obtient soit par l'intercalation de bobines de réaction, soit par la variation du rapport de transformation du transformateur.

Parallèlement à ces tentatives se développent aussi d'intéressants essais de traction par courant continu à haute tension : comme exemple, nous citerons la locomotive construite par la Compagnie de l'Industrie électrique pour la ligne de Saint-Georges-de-Commiers à la Mure (Isère), qui comporte 4 moteurs de 125 chevaux chacun, à 600 volts, constamment en série; le courant, à 2.400 volts, est amené à la locomotive par deux archets; le milieu du circuit des moteurs est à la terre par l'intermédiaire des rails, en sorte que la différence de potentiel dangereuse n'est que de 1.200 volts.

Les projets de grande traction électrique se développent rapidement; la Suède estime qu'avec ses 100.000 chevaux de chute d'eau elle pourrait alimenter ses 4.950 kilomètres de chemin de fer et réaliser ainsi une économie de 50 0/0 sur les 20 millions qu'elle dépense annuellement; la Suisse estime que 90.000 chevaux hydrauliques pourraient être utilisés sur ses voies ferrées; en France, l'exploitation électrique de portions de réseaux (Paris à Versailles, sur la Compagnie de l'Ouest; Paris à Juvisy, sur la Compagnie d'Orléans; le

Fayet-Saint-Gervais, sur le P.-L.-M.), a donné d'excellents résultats. En Amérique, le New-York Central possède une locomotive à quatre essieux, de 2.000 chevaux, 500 par essieu, à 500 volts par courant continu.

VI

La dernière grande application dont j'ai à rechercher l'évolution actuelle est l'éclairage. L'incandescence du charbon, soit dans l'arc, soit dans la lampe à incandescence, est jusqu'ici la source de lumière généralement employée. Peut-on trouver mieux que le charbon ? Il est permis de le supposer ; les propriétés du charbon le rapprochent en effet du corps noir théorique ; et l'on sait qu'il existe des corps réels ayant un rendement lumineux (rapport de la puissance rayonnée dans la partie visible du spectre à la puissance rayonnée totale), meilleur que celui du corps noir.

Dans le domaine de l'arc, au charbon pur on essaye de substituer des mélanges de plus en plus riches en sels métalliques. Ces charbons, introduits en 1900 par M. Bremer, ont été très étudiés et perfectionnés en France par notre confrère M. A. Blondel ; les charbons de M. Blondel, par exemple, sont formés d'un mélange de charbon et de matières minérales (en particulier fluorure de calcium additionné de borates alcalino-terreux) contenant jusqu'à 50 ou 60 0/0 de matières minérales; ce mélange forme un cylindre central protégé par une mince couche de charbon pur ; on l'emploie comme pôle positif, et, à l'inverse des arcs ordinaires, on le place en bas ; le négatif, situé en haut, est formé par un crayon de charbon ordinaire.

Les principes physiques de ces arcs sont tout différents de ceux des arcs ordinaires. Dans ceux-ci, la véritable source de lumière (pour 85 0/0 du flux lumineux total environ) est non pas l'arc lui-même qui, malgré sa haute température, est peu éclairant, mais le cratère positif sur lequel se produit la base de l'arc et dont la température n'est limitée que par la température d'ébullition de la substance qui forme l'électrode : on cherche donc à élever cette température au maximum en choisissant le corps le plus réfractaire, c'est-à-dire le carbone.

Au contraire, dans le cas des charbons fortement minéralisés, les sels fusibles de chaux, par exemple, qui entrent dans leur composition, ont un point de volatilisation relativement bas, et la tem-

pérature du cratère devient très inférieure à celle des charbons ordinaires; mais alors l'arc lui-même est lumineux et constitue une véritable flamme très éclairante; grâce au pouvoir émissif de ces vapeurs, qui favorisent l'émission des rayons lumineux au détriment de celle des rayons obscurs, cette incandescence est plus avantageuse au point de vue du rendement que celle du charbon : aussi descend-on à des consommations spécifiques extrêmement faibles, 0,25 watt environ par bougie moyenne sphérique par exemple.

Parallèlement à ces recherches sur l'arc s'effectuent des recherches analogues sur la lampe à incandescence; la lampe Nernst a été la première tentative, réellement couronnée de succès, de substitution au charbon d'autres corps rayonnants ; ces corps sont des oxydes métalliques, ou conducteurs de deuxième classe, qui sont sensiblement isolants aux températures ordinaires, et ne deviennent conducteurs que lorsqu'ils ont été préalablement chauffés. Dans une autre voie, on a cherché à substituer au charbon des métaux à grand pouvoir réflecteur qui utilisent mieux que le corps noir l'énergie rayonnée : on se souvient que, bien avant la lampe à incandescence à filament de carbone dans le vide, on avait songé à utiliser le platine ; mais le point de fusion de ce métal était encore trop bas pour en utiliser convenablement l'incandescence; toutes les recherches récentes ont été dirigées en vue de trouver un métal rayonnant plus réfractaire encore que le platine : la lampe à osmium de Auer, la lampe à tantale de Siemens et Halske rentrent dans cette catégorie; on sait aujourd'hui préparer le tantale sous forme de fils étirés de cinq centièmes de millimètre de diamètre, qui peuvent être portés dans le vide à une température fort élevée sans fondre ; dans ces conditions, la consommation s'abaisse à 1,5 watt par bougie.

A cause de la grande conductibilité du métal employé, le filament de ces lampes doit avoir une longueur très considérable (650 millimètres pour une lampe de 25 bougies 110 volts) et être replié en zigzags pour tenir dans une ampoule de dimensions ordinaires.

Enfin nous devons signaler une lampe toute récente due à M. Canello et qui présente le plus grand intérêt : elle se compose d'un filament formé d'oxydes alcalino-terreux et recouvert d'une mince couche d'osmium métallique: elle participe donc à la fois de la lampe Nernst et de la lampe Auer.

Telle est, Messieurs, la vue d'ensemble que je désirais vous donner sur le développement actuel de l'électrotechnique ; deux caractères

essentiels s'en dégagent : la tendance constante vers la grandeur des résultats, et vers la simplicité des moyens d'action ; grandeur et simplicité, ce sont aussi les caractères des sources d'où tout est sorti, je veux dire des immortelles découvertes d'Ampère et de Faraday.

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'ÉLECTROCHIMIE [1] ;

Par M. Chaumat,
Sous-Directeur de l'École supérieure d'Électricité.

Le temps dont je dispose ne me permettrait pas de passer en revue toute l'industrie électrochimique actuelle, même en me bornant à une simple nomenclature. Il n'est, en effet, presque aucune partie du domaine de la chimie industrielle où l'électricité n'ait été appelée à jouer, sous une forme ou sous une autre, un rôle plus ou moins important.

D'autre part, un grand nombre d'industries électrochimiques sont aujourd'hui classiques : le raffinage du cuivre, la fabrication de l'aluminium, des chlorures décolorants, des chlorates, des alcalis caustiques et du chlore. Je me bornerai, dans cette revue des progrès récents de l'électrochimie industrielle, surtout aux applications du four électrique. C'est d'ailleurs là que se sont produits, dans ces dernières années, les progrès les plus remarquables.

Avant d'aborder cette étude, j'ai quelques réserves à faire au sujet du titre de cette conférence. Les usines électrochimiques sont en effet d'un accès très difficile, pour ne pas dire impossible. Pour des raisons sans doute très respectables, le mystère ne paraît pas moins nécessaire aux opérations des chimistes modernes qu'à celles des primitifs adeptes de la science hermétique. Dans ce qui va suivre, je n'ai guère pu faire état que des documents publiés et de quelques rares renseignements obtenus directement.

Il est intéressant de rechercher les raisons d'ordre général qui ont provoqué un essor si rapide de certaines industries électrochimiques. On peut dire que l'usine électrochimique se distingue :

1° Par une mise en œuvre de matières premières plus simples et plus directement utilisées ;

---

[1] Conférence faite le 2 mai 1905.

2° Par l'absence à peu près complète de sous-produits, et, comme conséquence, une économie de main-d'œuvre;

3° Par un rendement bien meilleur.

Sur les deux premiers points, il n'est pas d'exemple plus remarquable que la fabrication du chlorate de potasse par voie électrolytique. A des réactions secondaires près, qui sont d'ailleurs sans grande importance, l'opération se réduit à la fixation de l'oxygène de l'eau sur le chlorure de potassium :

$$KCl + 3H^2O = ClO^3K + 3H^2.$$

Dans les anciens procédés, purement chimiques, les 5/6 du chlore de KCl étaient définitivement rejetés à l'état de chlorure de calcium.

Le nombre des industries chimiques dans lesquelles les sous-produits peuvent rentrer dans la fabrication sans une complication extrême de la main-d'œuvre est très restreint.

Sur le troisième point, on peut dire qu'une opération chimique a un rendement le plus souvent extrêmement faible. Prenons comme exemple la réduction d'un oxyde métallique par le charbon. Il est bien certain que, pour chaque atome de carbone qui brûle aux dépens de l'oxygène de l'oxyde, le rendement est de 100 0/0. Mais il y a autre chose. Pour provoquer la réaction, il a été nécessaire de chauffer le mélange pour l'amener à une température convenable : nous devons donc dépenser une quantité de charbon supplémentaire. De plus, le mélange est placé dans des récipients que l'on chauffe de l'extérieur; la chaleur va être très mal utilisée.

Exemple : d'après les tables des données thermochimiques, pour la réduction de l'oxyde de zinc, il faut fournir

1.330 calories (kg.-degré) par kg. de zinc.

Dans la pratique, on compte sur une consommation de 10 kilogrammes de charbon par kilogramme de zinc produit. En admettant pour le charbon un pouvoir calorifique de 7.500 calories au kilogramme en moyenne, on trouve que la quantité de chaleur réellement fournie est 56 fois plus grande que la quantité théorique : le rendement ressort à 1,8 0/0. C'est faible, et l'on conçoit qu'on puisse demander à autre chose qu'à la combustion d'un charbon extérieur l'énergie nécessaire pour assurer la réaction, si cette énergie est mieux utilisée. C'est précisément ce que l'on demande au four électrique. Dans des expériences faites en 1903, à l'usine électro-

chimique de Crampagna (Ariège), pour la réduction de l'oxyde de zinc, le décompte de l'énergie consommée conduit à un rendement de l'ordre de 30 0/0.

Les caractères que je viens d'énumérer et des avantages nouveaux apparaîtront bien mieux si nous abordons l'étude du four électrique.

Fours électriques. — Le four électrique a été au début une enceinte réfractaire dans laquelle la matière à chauffer était soumise à l'action d'un arc électrique.

L'arc agit comme source purement thermique, et on peut l'alimenter soit avec du courant continu, soit avec du courant alternatif. Il n'y a guère que la seule exception du four à aluminium, où le métal est obtenu par l'électrolyse de l'alumine dissoute dans de la cryolithe fondue et où, par suite, le courant est nécessairement continu.

On peut reconnaître à l'emploi du four électrique les avantages suivants :

1° La température est plus élevée que dans les fours industriels. Les réactions y seront par suite plus complètes et, en raison même de l'élévation de la température, il sera possible de produire des réactions nouvelles. L'industrie du carbure de calcium en est un remarquable exemple, et nous en trouverons tout à l'heure un autre dans l'industrie des sels de baryte ;

2° La source de chaleur est intérieure ; le rendement sera, par suite, incomparablement meilleur. De plus, pour les réactions se produisant à très haute température, on évitera la détérioration rapide des récipients.

L'industrie du phosphore en est un exemple. On a réalisé une grande économie sur la casse des cornues par l'emploi du four électrique. De plus, on peut réduire directement les phosphates naturels et le phosphate tricalcique des os qu'il suffit de chauffer avec un mélange de sable siliceux et de coke. La fabrication préliminaire du phosphate acide de calcium est supprimée ;

3° La température très élevée permet, dans des opérations métallurgiques, la formation de scories fondues, faciles à séparer du métal. La possibilité de refroidir les parois autorise des compositions de scories, acides, basiques ou fluorées, très corrosives, qu'on ne peut admettre dans les fours métallurgiques ordinaires ;

4° Le réglage de la température est plus facile par un simple réglage électrique. On pourra par exemple surchauffer à un moment donné, pour une addition ou une coulée ;

3° Enfin, l'atmosphère n'est pas oxydante.

Les formes très nombreuses des fours modernes ne s'éloignent pas beaucoup du premier type de four industriel dit *four à carbure*, réalisé par M. Bullier, et qui comportait une électrode de charbon et une sole conductrice en charbon (Voir le schéma, *fig.* 1).

Fig. 1.

Les fours industriels modernes atteignent les dimensions suivantes : 1 mètre à 1^{m},50 de côté sur 1 mètre de profondeur. La puissance consommée y atteint de 500 à 600 kilowatts, et les courants y sont de 3.000 à 10.000 ampères.

On peut adopter, avec M. Keller, la classification suivante, basée tant sur le mode de fonctionnement que sur la forme.

1° *Fours à arcs.* — L'arc jaillit au-dessus de la matière à chauffer entre deux électrodes ou entre deux séries d'électrodes en parallèle (*fig.* 2), ou bien encore entre une électrode et une masse fondue con-

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 4.

ductrice (*fig.* 3), ou enfin on peut avoir deux électrodes assez éloignées l'une de l'autre et deux arcs en série entre chaque électrode et la masse conductrice (*fig.* 4).

Ces fours ne conviennent pas à la réduction des minerais ; ils sont,

au contraire, très bien appropriés à l'affinage d'un bain métallique, en raison de la nécessité d'une nappe fondue facilement accessible pour les prises d'échantillons et les additions.

2° *Fours à résistance.* — Les électrodes sont dans la masse de la matière à traiter, qui constitue un conducteur simplement chauffé par le passage du courant. Ces fours conviendront à la réduction des minerais. Parfois on dispose une âme conductrice entre les électrodes quand la matière à traiter n'est pas elle-même conductrice, au moins à froid.

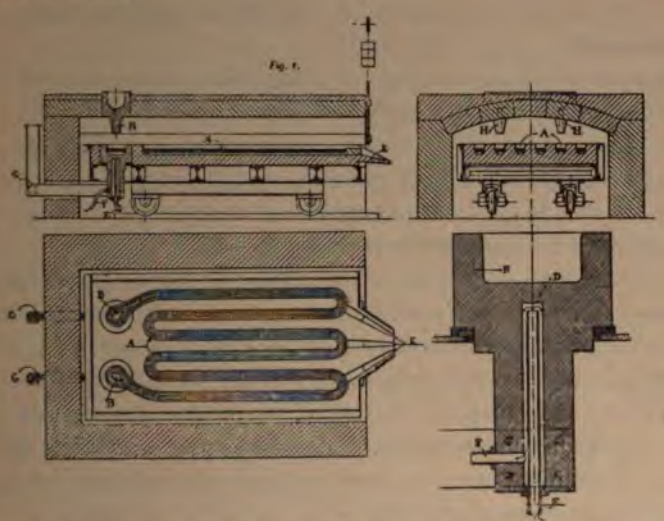

Fig. 5. — Four Gin. — A, creuset-canal ; B, B, blocs d'acier refroidis par une circulation d'eau, formant prise de courant ; G, G, conducteurs d'amenée du courant. Au moment du fonctionnement, le creuset, porté par un chariot, est disposé sous une voûte portant les entonnoirs H, H, par lesquels on verse la fonte liquide. On ajoute une proportion calculée de riblons ; puis, quand le mélange est bien fondu, on charge du minerai à la pelle par petites portions en suivant les progrès de la décarburation (1).

Parfois c'est le bain métallique à traiter qui sert de conducteur : on est alors gêné par la trop grande conductibilité du métal. C'est ce qui a conduit M. Gin à imaginer un four où le métal à traiter est contenu dans un canal de grande longueur et de faible section (*fig.* 5).

3° *Fours à résistance superficielle.* — La faible résistivité des bains métalliques fondus (de l'ordre de 200 microhms-centimètres) a con-

(1) Cette figure est empruntée au *Bulletin technologique de l'Association des Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers.*

duit à produire l'effet Joule dans la couche de laitier plus résistant située à la partie supérieure. On obtient ainsi les fours à résistance superficielle. On peut d'ailleurs, en soulevant les électrodes, obtenir un fonctionnement en four à arc.

4° *Fours à induction.* — Enfin il existe un quatrième type de fours sans électrodes. Ils servent à l'affinage. Nous les retrouverons en parlant de la fabrication des aciers. Leur capacité ne peut être aussi grande que celle des fours précédents, pour des raisons d'ordre électrique.

Matériaux des fours. — Les fours sont : en *charbon* pour la fabrication du carbure de calcium et des fontes spéciales autres que le ferrochrome ;

En *minerai de chrome* pour la fabrication du ferrochrome ;

En briques de *dolomie* pour les fours à acier ;

Ou constitués par des *mélanges* de charbon avec de la chaux, de le magnésie, du minerai de chrome, etc., suivant les usages. Ces mélanges sont le plus souvent moulés en briques que l'on cuit.

Les électrodes sont toujours en charbon.

Fabrication des électrodes. — La fabrication des électrodes est devenue une industrie importante. La seule usine de Notre-Dame-de-Briançon en fabrique annuellement plus de 1.000 tonnes. Mais, le plus ordinairement, les industriels fabriquent eux-mêmes leurs électrodes.

Du charbon de cornues, des cokes, des débris d'électrodes ou de vieux fours sont finement broyés et malaxés avec une petite quantité de brai. On obtient une pâte que l'on moule sous pression et que l'on soumet à une cuisson progressive.

Les électrodes ont le plus généralement la forme de parallélipipèdes de section carrée de 30, 40 et même 50 centimètres de côté.

On peut fabriquer de même des briques de charbon, des soles de charbon ou des fours complètement en charbon.

Parfois on sacrifie la durée en cherchant à obtenir un prix de revient aussi faible que possible. Les objets sont moulés à l'aide de vérins à bras ou même simplement damés.

Le plus souvent on cherche à faire durer les électrodes ou les fours en les fabriquant mieux. Le moulage est fait à l'aide de presses hydrauliques très puissantes.

La cuisson des électrodes est menée d'une façon très progressive jusqu'à 1.200°. L'opération dure huit jours.

A l'usine de la Praz, en Maurienne, le four à cuire les électrodes, de 70 mètres de long, est à marche continue. Il est rempli d'une file

ininterrompue de vagonnets portant des boîtes à sable qui contiennent les objets à cuire. Il est chauffé dans sa partie centrale par des gaz de gazogènes. A des intervalles réguliers, on introduit à l'une des extrémités du four un wagonnet nouveau qui est poussé par une presse hydraulique et fait sortir un wagonnet à l'autre extrémité du four. Les gaz suivent une marche inverse.

Les électrodes ainsi obtenues sont denses, sonores. Leur conductibilité et leur durée dépendent de la compression initiale.

On obtient des résultats bien meilleurs encore par l'emploi des électrodes graphitisées.

Production du graphite. — Dès 1895, MM. Girard et Street avaient montré qu'en portant le carbone amorphe à très haute température par l'arc électrique on le transforme plus ou moins complètement en graphite. La pièce à graphitiser défile entre deux arcs en série. C'est leur procédé qui est appliqué à Levallois par la Société Le Carbone [1].

On peut se contenter, quand la forme des pièces s'y prête — et c'est le cas des électrodes — de les porter elles-mêmes au rouge blanc par l'action d'un courant électrique, en vase clos ou sous une couche de poussier. On admet une densité de courant de 30 ampères par centimètre carré ; quelques heures sont nécessaires pour la transformation complète.

MM. Girard et Street avaient remarqué qu'on obtenait de bien meilleurs résultats en employant, au lieu de charbon pur, un charbon contenant 2 0/0 de silice, d'acide borique ou de fer porphyrisé.

Une étude attentive des circonstances de formation du graphite dans son four à carborundum a montré à M. Acheson que cette formation était due à la production préalable d'un carbure qui se dissocie ultérieurement. La réaction se fait de proche en proche, et il est inutile d'employer la quantité de métal nécessaire pour la combinaison de tout le carbone. On fait une pâte de

97 parties de carbone finement divisé,
3 parties d'oxyde de fer ;

on moule et on porte les pièces à une température très élevée dans

[1] Voir le mémoire de M. Ch. Street dans le *Bulletin de la Société internationale des électriciens* de mai 1895.

un cylindre de charbon traversé par un courant électrique, dont on rend l'action très progressive.

Les électrodes ainsi traitées sont bien plus denses; leur densité est de 2,25 au lieu de 1,5 à 1,9 des électrodes ordinaires.

Elles ne contiennent pas plus de 1/1000 d'impuretés, pas traces d'hydrocarbures.

Elles sont très résistantes au chlore, et on peut les utiliser comme anodes dans l'électrolyse des chlorures alcalins; elles commencent à se substituer aux anodes de platine.

La durée des électrodes de graphite est au moins 6 fois plus grande que celle des électrodes de carbone amorphe pour l'électrolyse des chlorures alcalins. Elles se désagrègent cependant à la longue, et il se forme du carbone flottant qui souille les bains. On retarde cette désagrégation des électrodes en les rendant moins poreuses. A cet effet on les paraffine dans la masse.

Les électrodes graphitisées ne paraissent pas résister mieux que les autres quand on les emploie comme anodes insolubles pour l'électrolyse des sulfates en solution aqueuse.

Elles résistent aussi très bien à l'oxygène; le carbone amorphe brûle de 370 à 385°; le graphite, à 660; aussi s'usent-elles beaucoup moins vite dans les fours où l'on réduit un mélange d'un oxyde métallique et de charbon; l'oxygène de l'oxyde se combine plus facilement au carbone du mélange qu'à celui des électrodes.

La résistivité du carbone amorphe est d'environ 3.200 microhms-centimètres; celle du graphite, de 700 à 850. Les électrodes graphitisées sont donc 4 fois plus conductrices. Par conséquent, à échauffement égal et pour les mêmes dimensions, on peut admettre un courant double. Mais on va plus loin, puisque les électrodes graphitisées ne s'oxydent qu'à une température plus élevée.

Aussi, pendant qu'on admet seulement 5 ampères par centimètre carré dans les électrodes cuites à 1.200°, on ne craint pas d'aller jusqu'à 20 dans les électrodes de graphite.

Il y a mieux. Le graphite se travaille au tour mieux que le fer le plus doux. On peut assembler entre elles des pièces filetées et séparer l'électrode en un support permanent et une électrode ouvrière qu'on pourra utiliser presque sans déchets (*fig.* 6). En vue d'assurer en effet la durée des supports métalliques qui soutiennent les électrodes et servent à l'amenée du courant, on ne peut approcher ces supports très près du foyer. C'est pour cela qu'on était autrefois

obligé de rejeter des bouts assez longs. Ces bouts n'étaient pas perdus ; ils servaient à la fabrication d'électrodes nouvelles. Mais la main-d'œuvre était irrémédiablement perdue.

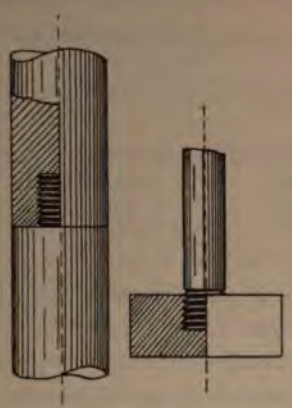

Fig. 6.

Il est difficile de fabriquer des électrodes graphitisées de très grande section, à cause des courants formidables qui seraient nécessaires et qui deviendraient d'un maniement très pénible.

Aussi, pour obtenir la section nécessaire, on associe entre elles, en parallèle, plusieurs électrodes de graphite. Elles sont vissées dans une même tête de graphite et les intervalles sont remplis d'un mélange de graphite granulé et de brai que l'on dame ou que l'on moule sous pression. L'ensemble est ensuite porté au four [1].

Nous connaissons maintenant le matériel, et nous allons passer en revue quelques industries intéressantes que j'étudierai dans cet ordre :

Fabrication des corps durs ;

Industrie des composés alcalino-terreux ;

Industrie des fers, aciers, fontes spéciales ;

---

[1] On fabrique non seulement par le four des objets graphitisés, mais du graphite granulé en chauffant pendant plusieurs heures de l'anthracite au moyen d'un courant électrique sous une couche de poussier. Le carbone forme avec les éléments de la cendre des carbures qui se dissocient ultérieurement par une élévation de température. Les impuretés sont éliminées à l'état de vapeurs.

Ce graphite en poudre est employé comme pigment pour la peinture d'ouvrages métalliques, et en qualité de lubrifiant comme succédané de la plombagine naturelle.

Fabrication des mattes cuivreuses.

Fabrication des corps durs. — *Carborundum*. — En réduisant à très haute température de la silice par du charbon, Acheson a obtenu, en 1891, un siliciure de carbone répondant à la formule SiC, qu'il a appelé carborundum. J'en rappelle rapidement la préparation et les propriétés.

On fait un mélange de :

54	parties de	sable pur.
34	—	coke pulvérisé.
10	—	sciure de bois.
2	—	sel marin.

La sciure de bois a pour effet de rendre la masse caverneuse et de faciliter le départ des gaz. La masse est tassée autour d'une âme de coke grossièrement granulé (grains de la grosseur d'une noisette), dans laquelle on fera passer un courant intense. C'est un four à résistance. La température doit y atteindre près de 3.500°.

On obtient ainsi, en très beaux cristaux, un corps infusible, incombustible, plus dur que l'émeri, qu'il peut remplacer dans tous ses usages. Il peut servir au polissage des diamants après la taille.

Il contient sensiblement 70 0/0 de silicium et 30 0/0 de carbone, et répond à la formule SiC.

On le pulvérise facilement et, en lui incorporant 30 0/0 d'argile, on en fait des meules que l'on cuit dans un four à poterie ordinaire.

Sa haute teneur en silicium le fait rechercher aujourd'hui dans la fabrication des aciers à la place du ferro-silicium. Il ne renferme en effet ni soufre ni phosphore.

Siloxicon. — En 1903, Acheson a obtenu, en réduisant la silice incomplètement à une température moins élevée (de 2.500 à 2.800°) et avec une quantité de carbone un peu moindre, un produit contenant du silicium, du carbone et de l'oxygène. C'est le siloxicon. Il se présente sous l'aspect d'une masse gris verdâtre, facile à pulvériser, s'agglutine avec de l'eau, se moule et se cuit comme une brique. On peut lui incorporer de l'argile.

Il se décompose à 3.500° pour donner du carborundum, mais résiste aux températures industrielles et n'est pas attaqué par les scories acides ou basiques et les métaux fondus. Il paraît par conséquent convenir très bien pour le garnissage des fours, creusets, convertisseurs employés dans les opérations métallurgiques.

Corindon. — En faisant passer un courant d'H sur du kaolin fondu au four électrique, on obtient de la vapeur d'eau, du siliciure d'H (SiH^4) et un sous-silicate d'alumine. L'action se prolongeant, on peut même obtenir ainsi de l'alumine fondue (dureté 8 à 9 de l'échelle ordinaire).

SiH^4 brûle à l'orifice du four en donnant de la silice sous forme de poussière extrêmement ténue qui peut servir au polissage des métaux fins.

Le sous-silicate d'alumine et l'alumine ainsi obtenus sont des matières très dures.

Le corindon artificiel peut aussi s'obtenir au four électrique par simple fusion d'alumine amorphe, de bauxite par exemple.

L'intérêt de cette fabrication est l'obtention d'un produit très homogène. Le corindon naturel n'est pas un produit très répandu, et il ne se trouve pas toujours dans le voisinage des centres d'utilisation.

Composés alcalino-terreux. — Je laisse de côté le carbure de calcium, dont la préparation et les propriétés sont aujourd'hui bien connues. Les grandes espérances qu'on avait fondées sur ce corps ne se sont pas réalisées immédiatement, et la production en France n'utilise pas actuellement le quart de la puissance des usines qui avaient été créées dans ce but spécial (la production en 1902 a atteint 12.000 tonnes, en France).

Mais c'est à cette crise, qui a pesé longtemps sur l'industrie du carbure, que l'on doit des recherches très nombreuses et la création d'industries nouvelles.

Siliciures alcalino-terreux. — Les siliciures alcalino-terreux, préparés pour la première fois en 1899 par la Ampère Electro-Chemical Company, ont même composition que les carbures :

$$CaSi^2,\ BaSi^2,\ SrSi^2.$$

On les produit au four en réduisant des mélanges d'oxydes, carbonates, sulfates des métaux alcalino-terreux et de silice en proportion théorique (2 atomes de Si pour 1 de métal), par la quantité de carbone juste suffisante pour la réduction.

On peut aussi réduire des silicates alcalino-terreux par le charbon si, dans ces silicates, il y a 1 atome de métal pour 2 de silicium.

Ils se produisent à une température un peu plus élevée que le carbure de calcium.

Ce sont des corps blancs ou blanc bleuâtre, à structure cristalline.

Ils s'oxydent lentement dans l'air à la température ordinaire, plus rapidement à chaud.

Ils décomposent l'eau en donnant un abondant dégagement d'hydrogène pur.

Le $CaSi^2$ décompose lentement l'eau froide, plus rapidement l'eau chaude.

Le $BaSi^2$ décompose rapidement l'eau froide et l'eau chaude.

Le $SrSi^2$ est intermédiaire.

1 kilogramme de siliciure de		calcium	dégage	1.169	litres d'hydrogène
1	—	strontium	—	772	—
1	—	baryum	—	571	—

Ce dernier composé — en raison de l'abondance du baryum dans la nature et de la facilité de la réaction — fournit à l'heure actuelle le procédé le moins coûteux pour la préparation de l'hydrogène pur (1).

Les siliciures alcalino-terreux sont de puissants agents de réduction. Si, dans une pâte claire d'indigo bleu et d'eau, on introduit du siliciure de baryum finement pulvérisé, on obtient instantanément une solution d'indigo blanc.

Ils pourront sans doute rendre de grands services en chimie organique pour les réductions en solutions neutres.

Sous l'action des acides dilués, le siliciure de baryum donne un

(1) Il est intéressant de mettre en regard un procédé de préparation de l'oxygène tout aussi commode et dont on doit également la mise au point industrielle à l'électrochimie.

On prépare depuis quelques années de grandes quantités de sodium métallique, en particulier aux chutes du Niagara et dans la vallée de la Romanche. Ce sodium est obtenu par l'électrolyse de soude caustique fondue à une température aussi basse que possible dans un vase de fer servant de cathode. Des anodes de même métal plongent dans la masse. Le sodium métallique monte à la surface et on le recueille à l'aide de cuillères de fer (la température est assez basse pour que le sodium ne s'enflamme pas).

Le sodium métallique est en grande partie transformé sur place en peroxyde de sodium par l'action de l'air sec et chaud.

Le peroxyde de sodium est utilisé à la préparation de l'eau oxygénée par son action sur de l'eau acidulée par SO^4H^2 et refroidie avec de la glace.

Sous le nom d'oxylithe, l'usine des Clavaux (vallée de la Romanche) prépare un peroxyde de sodium qui dégage de l'oxygène sous l'action de l'eau froide, environ 100 litres au kilogramme. Ce produit n'est pas du peroxyde de sodium pur. On dit que c'est un mélange de peroxyde de sodium et de permanganate (?). Il semble contenir de petites quantités d'oxydes qui favorisent sa décomposition.

Notons que les récipients qui servent au transport de l'oxygène comprimé à 120 ou 150 atmosphères ont un poids mort qui est 10 fois celui de l'oxygène, soit $1^{kg},400$ par 100 litres. Le rapprochement est intéressant.

dégagement d'hydrogène et de siliciure d'hydrogène. Le siliciure de calcium donne une réaction toute particulière :

$$CaSi^2 + 2HCl = CaCl^2 + Si^2H^2.$$

Le siliciure de strontium participe des deux réactions précédentes.

Le corps nouveau qui se forme, homologue de l'acétylène, a été appelé *silico-acétylène*. C'est un corps solide, jaune, qui donne avec les bases un silicate et un dégagement d'hydrogène. Ce sera un agent réducteur énergique en solutions alcalines.

Les siliciures alcalino-terreux sont des agents de désulfuration et de déphosphoration énergiques qui en feront peut-être de précieux auxiliaires dans la métallurgie du fer et de l'acier. Fondus avec du fer contenant du soufre et du phosphore, ils forment des sulfures et phosphures alcalino-terreux ; le silicium se dissout dans le métal. Une insufflation d'air dans la masse fait passer les sulfures et phosphures à l'état de phosphates, de sulfates, et le silicium brûle. L'élimination des impuretés paraît complète.

Industrie des sels de baryte. — Voici un exemple remarquable des qualités du four au point de vue de l'achèvement des réactions qui nécessitent une température élevée.

On sait que, pour fabriquer les sels de baryte, on réduit le sulfate de baryte naturel par le charbon (houille ou coke) dans des fours à réverbère. On ne peut guère convertir en sulfure de baryum soluble que les 70 0/0 du sulfate primitif.

En employant le four électrique, on arrive à transformer de 97 à 99 0/0 de sulfate de baryte.

Le procédé, employé en grand aux chutes du Niagara par la « United Baryum Company », a fait découvrir une réaction nouvelle qui se produit à des températures qu'on ne peut atteindre dans les fours à combustion. Quand on fond ensemble du sulfate de baryte et du sulfure de baryum, la réaction suivante se produit :

$$3BaSO^4 + BaS = 4BaO + 4SO^2.$$

La réaction n'est pas aussi complète que la précédente, sans doute à cause de l'inégale fusibilité des deux produits. Pratiquement on mêle le sulfate de baryte avec une quantité de charbon suffisante pour en réduire environ le quart à l'état de sulfure, et on chauffe le

mélange au four électrique. Le produit coulé renferme :

60 0/0 oxyde de baryum,
40 0/0 sulfure de baryum.

On lessive les blocs et on met à cristalliser ; on obtient directement de l'hydrate de baryte cristallisé. Le sulfure de baryum des eaux mères sert à préparer d'autres sels de baryte.

L'usine du Niagara fabriquait déjà, en 1902, 60 tonnes par jour d'hydrate de baryte cristallisé, dont le prix est tombé au quart de sa valeur. Il a trouvé immédiatement des débouchés, dont l'écartait autrefois son prix, notamment dans la fabrication des peintures blanches, l'épuration des eaux industrielles et surtout la récupération du sucre des mélasses de betterave.

Dans cette dernière industrie, on compte que l'hydrate de baryte permet de récupérer son propre poids de sucre cristallisé.

Cette baryte n'est pas perdue ; on la retrouve dans les écumes à l'état de carbonate. A l'usine de Foligno, en Italie, appartenant à la Société des Carbures et Dérivés, ce carbonate de baryte est traité au four pour la production de carbure de baryum. L'acétylène finalement obtenu est utilisé sur place à la fabrication de noir de fumée.

Métallurgie du fer et de ses dérivés. — Le haut fourneau est devenu un appareil si parfait et si bien adapté à son but que ce n'est pas dans la fabrication de la fonte que le four électrique est actuellement employé. On l'utilise surtout à la fabrication de l'*acier* et à l'obtention de certaines fontes spéciales connues sous le nom générique de ferros.

Fonte. — Cependant, depuis les travaux du métallurgiste italien Stassano, travaux qui datent de 1898, on sait faire de la fonte électriquement.

Dans une opération métallurgique au haut fourneau ordinaire, on demande au carbone un double rôle : 1° la réduction du minerai, et 2° par sa combustion propre, le dégagement de chaleur nécessaire à la possibilité des réactions.

On compte ordinairement, pour obtenir une tonne de fonte, une dépense de 1 tonne de coke, dont 350 kilogrammes seulement pour la réduction.

Dans le haut fourneau électrique, on demande à l'énergie électrique le dégagement de chaleur nécessaire pour provoquer les réac-

tions. Il est facile de se rendre compte que la substitution ne sera économiquement possible que dans des cas exceptionnels.

Avec M. Keller, nous admettrons une dépense en énergie électrique de 1 kilowatt-an de 8.400 heures pour obtenir 4 tonnes de fonte, plus une dépense de 350 kilogrammes de coke par tonne pour la réduction. Si K est le prix du kilowatt-an et si l'on admet pour le prix de la tonne de coke :

20 francs à l'usine métallurgique;

35 francs à l'usine hydroélectrique, à cause des frais de transport supplémentaires, la dépense de ces deux chefs sera :

$$\frac{K}{4} + \frac{35 \times 350}{1000}.$$

Si nous admettons, d'autre part, l'égalité des frais de main-d'œuvre et d'entretien et que la consommation des électrodes soit compensée par les frais de soufflage, l'équation de possibilité sera :

$$\frac{K}{4} + \frac{35 \times 350}{1000} \leq 20.$$

Ce qui donne $K \leq 32$ francs.

Ceci n'est réalisé qu'exceptionnellement. On cite en France comme détenant un record mondial l'usine hydroélectrique à chlorate de Chedde, où le coût de l'installation n'a pas dépassé 190 francs par kilowatt et où le prix de revient du kilowatt-an aux bornes des génératrices est de 30 francs.

Malgré cette condition prohibitive, la fabrication électrique de la fonte a été installée à l'usine de Kerrousse, près de Hennebont (Morbihan), par la Compagnie électrochimique qui exploite les brevets Keller.

Le haut fourneau Keller (*fg.* 7) présente un tronc de cône central pour la descente des charges au centre du creuset situé à la partie inférieure. Au-dessus du creuset sont disposées, aux quatre sommets d'un carré, quatre électrodes verticales couplées par deux en parallèle et deux en tension.

Au début, on met sur la sole en maçonnerie une couche de matières conductrices telles que scories ou riblons, on descend les quatre électrodes au contact ; on les relève ensuite progressivement.

Au moment de la coulée, on abaisse les deux électrodes les plus éloignées du trou de coulée et on relève les deux autres. Le four, qui

fonctionnait jusqu'alors comme four à résistance, en prenant 25 à 30 volts par foyer, marche maintenant en four à arc ; deux arcs longs très chauds se produisent et rendent tout à fait fluide le bain métallique.

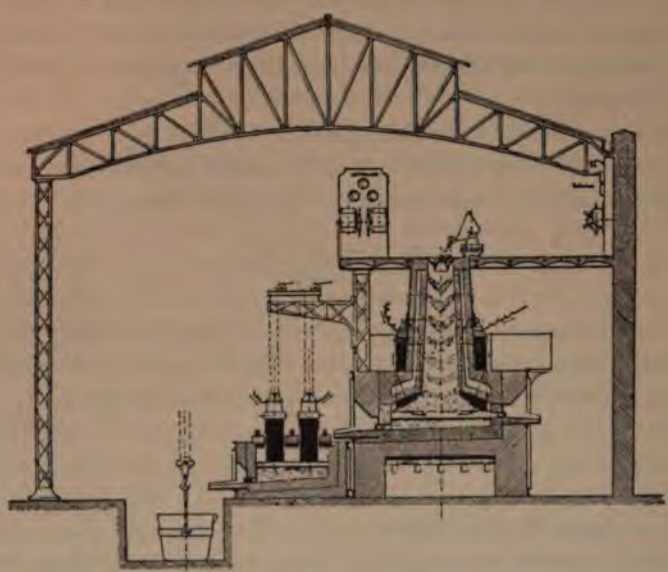

Fig. 7. — Haut fourneau électrique Keller. — Le four d'affinage dans lequel s'élabore l'acier est situé en contre-bas et reçoit la fonte liquide provenant du haut fourneau proprement dit [1].

Un four à affinage situé en contre-bas et sur lequel nous reviendrons tout à l'heure reçoit la fonte liquide.

Dans certains pays, éloignés des centres de production des cokes métallurgiques, et où se trouvent dans les régions minières des chutes d'eau d'un aménagement facile, le problème de la fabrication électrique de la fonte pourra certainement être abordé avec les chances économiques les plus sérieuses. C'est le cas du Brésil, où le coke anglais revient à 60 francs la tonne, et du Chili, où il revient à 100 francs en certains points.

Aciers. — La fabrication des aciers au four électrique est un autre problème. Tous les avantages du four sont ici précieux et surtout l'absence d'atmosphère oxydante qui permettra l'élaboration plus ra-

[1] Les fig. 7, 8 et 9 sont empruntées à l' « Electro-Sidérurgie » de la *Bibliothèque du Mois Scientifique et Industriel.*

pide du métal définitif. On n'aura pas à craindre non plus la perte par oxydation des matériaux qui servent aux additions finales en vue de l'obtention d'aciers spéciaux.

Le prix de l'énergie n'intervient lui-même que pour peu de chose. M. Keller estime, d'après ses expériences, à 850 kilowatt-heures environ l'énergie nécessaire pour fondre et affiner une tonne d'acier. En se plaçant dans les conditions très défavorables d'un prix de revient du kilowatt-an de 400 francs (usine à vapeur), c'est une dépense de 40 francs par tonne d'acier.

Dans une expérience faite à l'usine de la Praz par M. Héroult, à l'occasion du Congrès de la Houille Blanche, en septembre 1902, on a obtenu une consommation en énergie du même ordre. On avait pris comme point de départ de la fonte et des riblons froids. La réaction a duré de sept à huit heures et, avec une puissance moyenne de 400 chevaux, on a obtenu 2.200 kilogrammes d'acier.

Four Héroult. — M. Héroult a le premier obtenu l'acier électrique par coulées de 2.000 à 2.500 kilogrammes. Le four Héroult (*fig.* 8) est une demi-cuve cylindrique en tôle d'acier de $2^m,50$ de long. L'intérieur est revêtu de briques de dolomie. Il possède un couvercle de briques siliceuses au travers duquel passent par deux ouvertures carrées deux électrodes. C'est un four à arc, et il y a deux arcs en série, le bain servant de conducteur intermédiaire.

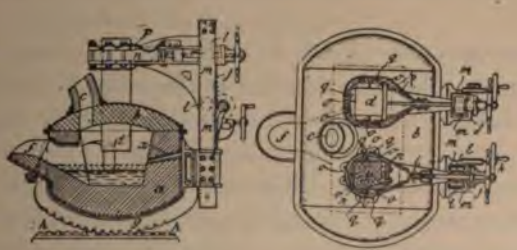

Fig. 8. — Four a acier Héroult.

Sur les plans des bases se trouvent deux portes de chargement. On peut charger aussi par le trou de coulée situé au milieu d'une génératrice.

Le four roule sur un plan poussé au moment de la coulée par un appareil hydraulique.

On y traite un mélange de riblons, de castine et de fonte; on fait

fondre par l'arc, on ajoute du minerai qui oxyde tous les métalloïdes et en *dernier lieu* le carbone. Après quatre ou cinq heures, on lave avec de la castine et on coule le laitier. On obtient à ce moment un acier extra-doux, même légèrement oxydé.

On le recarbure à l'aide de fontes très carburées et on ajoute à cet instant des ferros pour les aciers spéciaux.

L'élaboration de l'acier dans le four Héroult tient le milieu entre les deux procédés par dilution et oxydation de la fonte par le minerai, connus en métallurgie sous les noms de *scrap process* et d'*ore process*.

Le four Héroult est alimenté par du courant alternatif.

Il consomme 4.000 ampères sous 60 volts et peut produire 6 à 7 tonnes d'acier par vingt-quatre heures.

Depuis l'origine du procédé (1900), M. Héroult a fabriqué plus de 15.000 tonnes d'acier.

On installe en ce moment en Suède, près de Kortfors, des fours de ce type, mais d'une puissance de 450 kilowatts.

Four Keller. — Le four à affinage Keller est basé sur le même principe. C'est une cuve parallélipipédique à parois de dolomie et à enveloppe métallique. Les électrodes ne plongent pas dans le laitier, et, comme dans le four Héroult, il y a deux arcs en série. Les électrodes sont réglées indépendamment à la main (*fig.* 7). L'affinage de la fonte y est mené comme au four Martin par la méthode de l'ore process.

Four de Gysinge. — C'est un four d'un type très remarquable, sans électrodes. Inventé par Kjellin et Benediks, il a été mis en essai à Gysinge (Suède), depuis février 1900 (*fig.* 9).

C'est un transformateur dont le primaire est alimenté par de la haute tension (3.000 volts). Le secondaire ne comporte qu'une seule spire. Il est constitué par le métal même du creuset, qui a la forme d'un canal circulaire creusé dans un bloc de matière réfractaire disposé en couronne. Ce secondaire, constamment fermé sur lui-même, est traversé par un courant très intense qui amène rapidement le métal à l'état liquide. Le réglage de l'intensité et le surchauffage se font avec la plus grande facilité par le réglage de la tension. On n'a pas les ennuis de maniement des courants formidables des fours ordinaires.

Le premier type, installé en 1900, donnait 80 kilogrammes de métal par opération.

Depuis 1902, on en a mis en service un autre qui contient 1.800 kilogrammes de matière et peut fournir 4.100 kilogrammes d'acier en vingt-quatre heures avec 165 kilowatts. On ne vide jamais le four complètement et on ne retire à chaque coulée que 1.000 kilogrammes de métal.

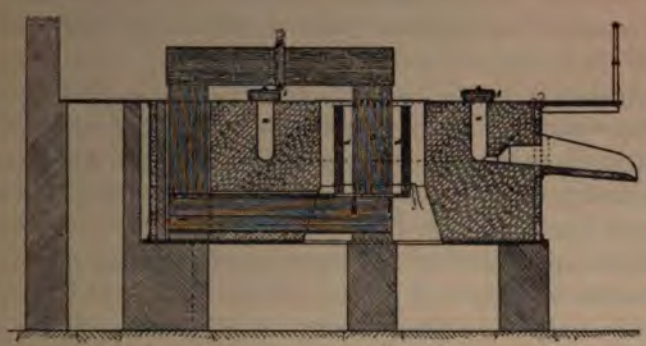

Fig. 9. — Four a induction de Gysinge. — *aa*, creuset formant, quand il est rempli de fonte, le secondaire à une seule spire d'un transformateur ; *c*, circuit magnétique du transformateur ; *dd*, circuit d'alimentation à haute tension.

On ne traite que de la fonte brute et des riblons. On obtient d'excellents aciers très pauvres en gaz, qui peuvent soutenir la comparaison avec les meilleurs aciers au creuset et qui sont même supérieurs comme résistance à la rupture.

Prix de revient. — D'après M. Keller, le prix de revient de la tonne d'acier fini en partant du minerai serait d'environ 100 francs la tonne. Cette évaluation est faite en supposant qu'on dispose de minerais de fer peu coûteux (minerai de fer à 55 0/0 rendu à l'usine à 10 francs la tonne) et que l'aménagement de la puissance hydraulique se présente dans des conditions extrêmement favorables qui ne se sont rencontrées jusqu'ici que tout à fait exceptionnellement.

M. Keller compte en effet le kilowatt-an de 8.400 heures à 50 francs, tous amortissements compris, et il admet une consommation de 2.800 kilowatt-heures par tonne d'acier fini. Cette consommation est inférieure à celle qui résulte des chiffres précédemment donnés pour la fonte et l'acier, parce que, dans cette dernière estimation, on part du minerai et qu'on évite de fondre à nouveau la fonte.

En Allemagne, où le minerai coûte le double et où l'énergie électrique est produite par des moteurs à gaz, on arriverait à un prix

de 200 francs environ par tonne. Dans ces conditions, on préfère travailler au four Martin, beaucoup plus économique.

Le procédé Kjellin, suivant une estimation donnée par M. Goldschmidt à la Société allemande Bunsen en 1903, conduirait à un prix de revient plus élevé encore de 215 francs par tonne. Il est vrai que là on cherchait à obtenir des produits aussi parfaits que possible et que l'on choisissait comme point de départ des matériaux très purs.

La conclusion semble être à l'heure actuelle que, en raison de la grande pureté de l'acier électrique et en admettant des conditions d'installations ordinaires, il soit possible aux usines électrosidérurgiques de concurrencer sérieusement l'acier au creuset, dont le prix de revient serait voisin de 375 francs la tonne.

Mais, si l'avenir du four électrique paraît très limité pour l'obtention des aciers courants, il n'en est plus de même si on le fait servir à la fabrication des fontes spéciales.

Les ferros. — Ces fontes spéciales, qui servent dans la métallurgie actuelle de l'acier fondu aux additions finales, sont surtout le ferromanganèse, le ferrosilicium, le ferrochrome et le ferrotungstène.

L'incorporation du silicium dans un bain d'acier fondu fait disparaître les soufflures et permet d'obtenir par moulage la forme définitive du premier coup sans qu'il y ait nécessité d'un forgeage ultérieur. On obtient de meilleurs résultats encore par l'emploi simultané du silicium et du manganèse. L'acier obtenu est plus doux et plus ductile.

On sait fabriquer depuis longtemps au haut fourneau ordinaire des *ferromanganèses* à haute teneur (titrant jusqu'à 80 et 85 0/0), et il n'y a pas eu intérêt à essayer des procédés électriques.

Ferrosilicium. — Le ferrosilicium est, au contraire, très difficile à obtenir au haut fourneau ordinaire à des teneurs un peu fortes. On ne dépasse pas 10 à 15 0/0. L'allure doit être très chaude et on consomme 3 tonnes de coke pour 1 tonne de ferrosilicium titrant 10 à 15 0/0, soit trois fois plus que pour 1 tonne de fonte ordinaire.

Le four électrique permet d'obtenir, à cause de la température plus élevée, des produits plus purs et plus riches titrant de 20 à 80 0/0.

On traite des mélanges convenablement dosés de :

Quartz (de préférence au sable).
Déchets de fer (qu'on préfère aux minerais à cause des absences de laitiers) et de coke ou anthracite.

Une tonne de ferrosilicium à 30 0/0 exige 3.500 kilowatt-heures.

Cette fabrication se fait surtout à l'usine de la Praz (four à arc à sole graphitique) et à l'usine de Livet où les fours du type à résistance absorbent 650 chevaux.

Ferrochrome. — Le ferrochrome sert pour l'obtention des aciers chromés utilisés pour la fabrication des blindages et des projectiles.

La fabrication au haut fourneau ordinaire est très difficile et très coûteuse. Elle a été une spécialité de Commentry.

On le fabrique aujourd'hui presque uniquement au four électrique et par le procédé de Hans Goldschmidt, qui a créé, dès 1897, sous le nom d'aluminothermie, toute une métallurgie nouvelle.

On traite au four un mélange de minerai de chrome (fer chromé), d'anthracite et de chaux ; on ajoute parfois un peu de bauxite pour faciliter la fusion du laitier.

On obtient ainsi des produits contenant 60 0/0 de chrome et 2 à 10 0/0 de carbone. Le prix est en raison inverse de la teneur en carbone.

587 francs la tonne	pour	10 0/0 de C
1.000 —		4 0/0 —

Aussi a-t-on avantage à obtenir un produit aussi peu carburé que possible.

Les premiers fours à une électrode et à sole de graphite (type du four à carbure) donnaient un produit à 10 0/0 de carbone.

Les fours en minerai de chrome à deux électrodes donnent le produit carburé à 4 0/0.

On a employé aussi des fours à une électrode et à sole conductrice formés d'un mélange de graphite et de minerai de chrome.

Le ferrochrome est très peu fusible, et le four doit être parfois sacrifié.

On le fabrique à la Praz, à l'usine d'Epierre, et surtout à Albertville, où M. Paul Girod s'est fait une spécialité de cette fabrication.

Le laitier est une chaux hydraulique à prise lente de bonne qualité qu'on utilise.

Ferrotungstène. — Le ferrotungstène sert à obtenir des aciers spéciaux surtout employés à la fabrication des ressorts, des aimants, et surtout des outils travaillant à grande vitesse, et en général des pièces qui chauffent beaucoup.

L'acier au tungstène à 0,5 0/0 possède en effet la curieuse propriété de ne pas se détremper, même au rouge sombre.

On l'obtient d'une façon analogue au ferrochrome en prenant comme point de départ le wolfram (tungstate double de manganèse et de fer).

Le produit obtenu titre de 80 à 85 0/0 de tungstène. Il est très dense ($d = 19$), plus infusible encore que le ferrochrome, et à peu près impossible à couler. Son prix dépend de la teneur : on compte 4 francs par kilogramme de tungstène.

On obtient aussi par des procédés analogues des *ferrotitane*, *ferrovanadium*, *ferromolybdène*.

Le vanadium et le molybdène communiquent à l'acier très doux des résistances à la rupture très élevées.

Le vanadium, comme le tungstène, donne aux aciers durs (contenant de 1 à 1,5 0/0 de carbone) la possibilité de supporter de très hautes températures sans se détremper (usage pour les aciers à outils).

Production des mattes cuivreuses. — Des expériences très intéressantes ont été faites en 1903, devant une Commission de métallurgistes, à l'usine de la Praz, puis à Kerrousse et à Livet, par M. Vattier, délégué du Gouvernement chilien. Le problème était le suivant :

Essayer d'obtenir, dans le voisinage de mines situées loin de la côte, — dans une région où le coke anglais revient à 100 francs la tonne, mais où se trouvent des chutes d'eau à débit régulier et d'un aménagement facile, — le premier terme de la métallurgie du cuivre, c'est-à-dire des mattes titrant de 40 à 50 0/0 de cuivre, à l'aide d'un minerai titrant 7 0/0 et provenant de la mine dite du « Volcan ». Le transport d'une matte riche est bien plus intéressant que le transport du minerai.

On s'est arrêté à la disposition suivante : un four de première fusion à arc où le minerai brut était directement introduit, et un avant-creuset fonctionnant comme four à résistance contenant deux électrodes réchauffeuses pour la séparation définitive de la matte et des scories. On commence avec quelques morceaux de charbon et des mattes.

Dimensions :

Fours : 1m,80 de longueur
— 0 ,90 de largeur
— 0 ,90 de hauteur
2 électrodes de 30 × 30 × 170

Avant-creuset : L = 1,20
— l = 0,60
— H = 0,60
2 électrodes 25 × 25

On a obtenu du premier coup un produit contenant 47,9 0/0 de cuivre.

Par l'emploi de fours à réverbère ordinaires, on compte que, pour une tonne de cuivre dans les mattes, il faut consommer 3,2 tonnes de coke, soit une dépense de 320 francs.

Dans le four électrique, pour la même tonne de cuivre, on a dépensé 10.640 kilowatt-heures, soit 38 francs d'énergie à 30 francs le kilowatt-an de 8.400 heures. Il convient d'ajouter une dépense de 75 kilogrammes d'électrodes (dont on peut estimer le prix de revient à 600 francs la tonne dans la région minière). C'est une dépense totale de 83 francs.

On évalue l'économie à 250 francs par tonne, au bas mot, surtout en raison d'autres avantages qui sont :

La suppression des ventilateurs;

La possibilité de fondre des minerais plus réfractaires ;

L'utilisation directe des menus et poussières qui sont chargés à la pelle. On évite ainsi la main-d'œuvre considérable de l'agglomération de ces débris en briquettes pour les fours actuels.

Enfin, il est possible de traiter des minerais pauvres à 4 0/0 qu'on rejette aujourd'hui.

Note sur la fabrication et les emplois industriels de l'ozone. — Il m'a été donné de visiter tout récemment en détail l'usine de *la Société française de l'Industrie chimique*. Cette usine, située à Courbevoie, utilise l'ozone à la fabrication de certains parfums. C'est, dit-on, la seule usine de ce type au monde. On a bien voulu m'autoriser à vous communiquer les renseignements que j'ai pu recueillir sur place, et je ne saurais trop remercier ici, pour ce rare exemple, l'administrateur délégué de la Société de l'Industrie chimique.

On sait que l'ozone s'obtient en soumettant de l'oxygène, ou industriellement de l'air, à l'action de l'effluve. Une tension très élevée

est nécessaire, 10.000 volts au moins. Il y a une tension critique, variable avec la forme des ozoniseurs, et à partir de laquelle on obtient une *pluie de feu* caractéristique. A partir de là, la production d'ozone croît très rapidement avec la tension (comme le carré, a-t-on dit). Il semble aussi que le rendement croisse avec la fréquence, et, dans certains ozoniseurs, on emploie de véritables décharges oscillantes. Il y a un grand intérêt à opérer avec de l'air aussi froid que possible.

D'après les données thermochimiques, 1 kilowatt-heure devrait produire :

1.393 grammes d'ozone.

Les appareils industriels ne donnent qu'un rendement de 3 à 5 0/0.

On peut compter sur une production de 40 grammes d'ozone environ par kilowatt-heure, avec une teneur de 3 milligrammes au litre environ.

A 0 fr. 10 le kilowatt-heure, le kilogramme d'ozone revient à 2 fr. 50 environ. C'est deux fois et demie plus que la quantité équivalente de chlore, quatre fois moins que la quantité équivalente d'eau oxygénée. On voit qu'il suffirait d'une amélioration assez faible du rendement pour que l'ozone puisse lutter contre tous les oxydants industriels.

Même avec ce prix de revient élevé, l'ozone se recommande par l'énergie de son action, une grande facilité d'emploi et l'absence de sous-produits, de résidus difficiles à éliminer.

On emploie l'ozone :

1° Au blanchiment des tissus, de la cire, des fécules;

2° Au vieillissement artificiel des liquides alcooliques;

3° Au vieillissement des bois des instruments de musique (un séjour de douze à vingt-quatre heures dans une chambre contenant de l'air ozoné suffit pour donner au bois, par l'oxydation des matières résineuses, la sonorité que l'on recherche et qui ne s'acquiert spontanément qu'au bout d'un temps très long) ;

4° A la stérilisation des eaux potables ;

5° A la fabrication des parfums.

Stérilisation des eaux potables. — Le procédé de stérilisation des eaux potables par l'ozone a été imaginé par MM. Abraham et Marmier. Des expériences faites tout d'abord à Lille, en 1898-1899, devant une Commission de bactériologistes, puis à Paris, sous le contrôle de l'Administration de l'Assistance publique, ont montré que ce

procédé était le plus efficace que l'on pût employer pour la destruction des germes pathogènes. L'ozone n'apporte à l'eau aucun élément nuisible à la santé. L'eau reste fraîche; elle se trouve énergiquement aérée et n'est dépourvue d'aucun de ses éléments minéraux utiles.

L'eau ruisselle sur des matériaux inertes dans une sorte de tour de Gay-Lussac, dans laquelle de l'air ozoné à 6 milligrammes par litre circule de bas en haut.

La dépense n'excède pas un centime par mètre cube d'eau stérilisée.

Les procédés de MM. Abraham et Marmier sont actuellement employés par la ville de Cosne pour la totalité des eaux d'alimentation (100 mètres cubes à l'heure), par la brasserie de la Méditerranée, à Marseille, pour la totalité des eaux qui servent dans l'usine (20 mètres cubes à l'heure), et dans les mines du Boléo pour une puissance du même ordre [1].

Fabrication des parfums. — L'usine de Courbevoie utilise une puissance totale de 400 chevaux à la conduite de pompes, aspirateurs, machines à glace, et à l'alimentation d'une batterie de 200 ozoniseurs de chacun 1 mètre carré de surface environ. Deux alternateurs de 60 kilovolt-ampères produisent un courant alternatif à la fréquence 80 et sous la tension de 250 volts que des transformateurs élèvent à 12.000.

L'ozoniseur de la Société française de l'Industrie chimique est ainsi constitué : Une feuille d'aluminium (le métal commun qui résiste le mieux à l'action de l'ozone) repose horizontalement sur un bloc d'ardoise (*fig.* 10). A 3 millimètres au-dessus de cette lame, et maintenue à distance par de petites cales en verre, se trouve une lame de verre de 6 millimètres d'épaisseur sur la face supérieure de laquelle est collée une feuille d'étain carrée de 1 mètre de côté. Cette feuille d'étain et la lame d'aluminium constituent les deux armatures de l'ozoniseur, et l'effluve jaillit ainsi dans le petit espace d'air de 3 millimètres d'épaisseur. La lame d'aluminium et le bloc d'ardoise sont percés en leur centre d'un trou où aboutit le tuyau d'aspiration de l'air ozoné. L'air extérieur, refroidi par des blocs de glace disséminés dans la pièce, accède librement par les bords.

L'ozoniseur n'est pas alimenté directement par la haute tension. Au-dessus de l'ozoniseur se trouve un condensateur formé par deux

---

[1] On trouvera d'intéressants détails sur les appareils à ozone de M. Abraham dans le *Bulletin de la Société internationale des Electriciens* de novembre 1900.

feuilles d'étain de 60 × 60 centimètres collées sur les deux faces d'une lame de verre de 6 millimètres d'épaisseur. La feuille d'étain inférieure du condensateur est reliée par des supports d'aluminium

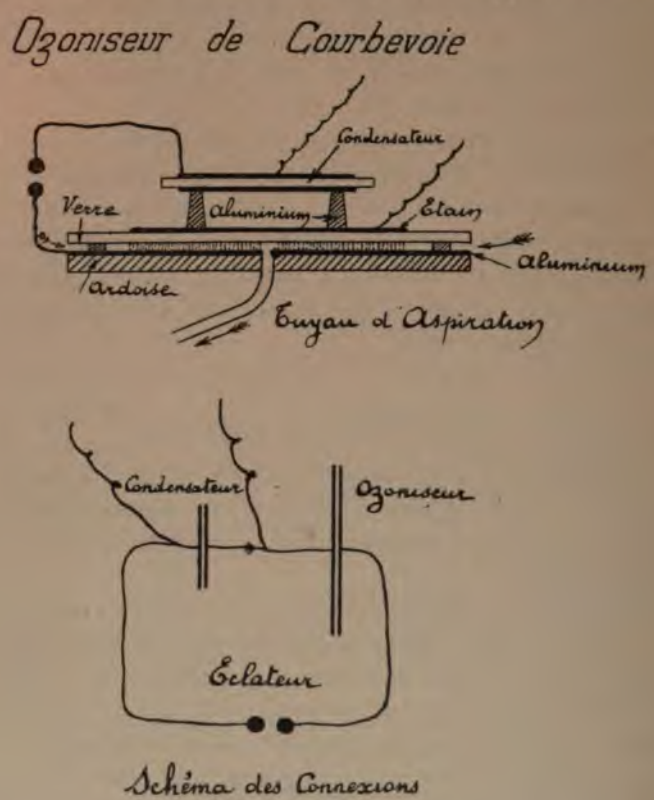

Fig. 10.

à l'armature d'étain de l'ozoniseur. Les points alimentés par les transformateurs sont l'armature supérieure du condensateur et la feuille d'étain de l'ozoniseur. Un *éclateur* à boules met en relation l'armature supérieure du condensateur et la lame d'aluminium. L'effluve est en série avec l'étincelle, dont l'éclat et le bruit dénotent une décharge oscillante (1).

On règle l'aspiration de façon à ne pas dépasser une teneur en ozone de 2 à 3 grammes par mètre cube. On produit ainsi 1 kilo-

(1) Tous les constructeurs d'appareils à ozone s'accordent à dire que la décharge oscillante favorise la production de l'ozone.

gramme d'ozone à l'heure avec une dépense de 35 à 40 kilovolt-ampères (facteur de puissance, 0,6 à 0,7).

L'air ozoné est employé à l'usine de Courbevoie pour la fabrication de certaines aldéhydes : le *pipéronal*, connu en parfumerie sous le nom d'héliotropine, obtenu par l'oxydation de l'isosafrol ; l'*aldéhyde anisique* (nom commercial *aubépine*), obtenue par l'oxydation de l'anéthol ou plus simplement de l'essence d'anis, qui en est presque entièrement formée. Mais la production importante est celle de la *vaniline*, obtenue par oxydation de l'isoeugénol. Voici le schéma de cette fabrication.

Fabrication de la vaniline. — Le point de départ est l'essence de clous de girofle. Cette essence est préparée à l'usine même.

On chauffe cette essence avec de la potasse en solution aqueuse. On chauffe à la vapeur pour séparer par distillation certaines impuretés de la masse cristalline d'eugénate de potasse.

L'eugénate de potasse est chauffé à 300° avec un excès de potasse. L'isomérisation se produit.

On traite par l'acide sulfurique pour séparer l'isoeugénol.

L'isoeugénol est oxydé dans des barboteurs à aspiration où circule l'air ozoné. On ne cherche pas à transformer tout l'isoeugénol, car l'oxydation serait trop complète, et il y aurait formation d'une quantité considérable de matières résineuses qui se produisent d'ailleurs toujours. Il ne faut pas non plus transformer trop peu d'isoeugénol, sous peine d'accroître considérablement la main-d'œuvre. Des considérations économiques très simples permettront de déterminer le degré d'oxydation à atteindre.

La vaniline produite est isolée par la combinaison bisulfitique ordinaire. Le liquide isolé du composé bisulfitique est distillé dans le vide pour récupérer l'isoeugénol non altéré qui rentre dans la fabrication. Le résidu de cette distillation est constitué par des résines que des fabricants de vernis utilisent.

La combinaison bisulfitique est décomposée par l'acide sulfurique. La vaniline est dissoute dans la benzine. La dissolution, soumise à la distillation dans le vide, donne comme résidu la vaniline brute, qu'on purifie par plusieurs cristallisations dans l'eau [1].

---

[1] Le rendement est d'environ 1 kilogramme de vaniline pour 50 kilogrammes de clous de girofle.

Avec sa batterie de 200 ozoniseurs, l'usine de Courbevoie peut fabriquer par jour 80 kilogrammes de vaniline d'un prix actuel de 50 francs le kilogramme.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DANS LA CONSTRUCTION DES DYNAMOS A COURANT CONTINU [1] :

Par M. R.-V. Picou,
Ingénieur des Arts et Manufactures.

La construction des machines dynamo-électriques repose sur des lois physiques parfaitement établies ; mais il y a loin de l'expression physique de quelques lois à leur mise en œuvre concrète sous forme d'une machine destinée à remplir une fonction industrielle déterminée.

Cette mise en œuvre est tout l'art de l'ingénieur. Comment celui-ci transforme-t-il l'appareil des équations physiques en formules simples d'application ; comment, en un mot, transporte-t-il la physique dans le bureau d'études d'une usine? C'est là ce que vous avez désiré entendre, et ce que vous avez bien voulu me demander d'exposer, en me limitant au sujet spécial des dynamos à courant continu ; c'est ce que je vais essayer de vous décrire aussi sommairement et clairement qu'il me sera possible.

Les lois générales qui sont la base physique de l'établissement de ces machines sont au nombre de trois, qui sont :

La loi de l'induction électromagnétique ;

La loi d'Ohm ;

La loi de l'induction magnétique.

Leurs expressions mathématiques les plus voisines de celles dont la pratique fait usage sont :

$$e = n\frac{d\Phi}{dt};$$

$$i = \frac{e}{r};$$

$$\Phi = 4\pi n i \Sigma \frac{\mu S}{l}.$$

Tel est le point de départ physique ; voyons maintenant le côté industriel :

Toute machine est conçue en vue d'une application déterminée, et c'est cette application même qui définit les conditions dans lesquelles elle devra fonctionner. Ces conditions sont aussi variées que les besoins de l'industrie. Tantôt il s'agira d'obtenir un courant variable

[1] Conférence faite le 8 mai 1905.

dans de larges limites avec une tension constante aux appareils d'utilisation : dynamos pour éclairage par lampes en dérivation, par exemple. Tantôt ce sera l'inverse qui sera nécessaire, courant constant et tension variable, comme dans un survolteur de batterie d'accumulateurs ; enfin on rencontrera encore toutes les conditions intermédiaires imaginables.

Quelles que soient ces conditions, elles peuvent toujours se résumer pratiquement ainsi qu'il suit :

1° On connaîtra toujours la tension maxima et le courant maximum ; ils définissent la puissance P de la machine ;

2° On connaîtra la loi de variation des deux facteurs E et I de la puissance, variation qui définit ses propriétés particulières.

A ces deux ordres de données correspondent deux phases bien distinctes de l'étude, savoir :

1° Le calcul proprement dit des dimensions géométriques et électriques ;

2° La prédétermination des conditions de fonctionnement, c'est-à-dire de la variation relative de E et de I.

Cette seconde partie peut naturellement conduire à recommencer la première pour serrer de plus près, au moyen d'approximations successives, le résultat visé.

Le calcul pratique exige que la notation des formules soit très simple. Les différentielles et intégrales n'ont pas cours dans les bureaux d'étude, et l'ingénieur doit d'abord simplifier dans la mesure du possible les formules de la physique, sans sacrifier leur rigueur, pour faire du calcul une véritable opération industrielle.

La loi d'Ohm possède toute la simplicité de forme désirable.

La loi de l'induction électromagnétique est facilement réductible à de nombreuses formes simples. L'une des plus commodes est :

$$e = 4nf\Phi,$$

où n est le nombre de spires entre balais successifs ;
f, la fréquence du renversement du flux dans l'induit ;
Φ, le flux émanant d'un pôle.

Enfin, vient la loi de l'induction magnétique, qui n'est entrée qu'assez tardivement, avec toute sa rigueur, dans le calcul des dynamos, bien qu'elle fût contenue dans les traités d'électricité. Elle n'y était pas énoncée sous une forme bien explicite, et la facilité de son application restait masquée sous les symboles physiques. Ce n'est

que par une assimilation hardie, par analogie entre la création d'un flux et celle d'un courant, que les ingénieurs ont pu l'introduire dans leurs calculs, mais seulement après dix années de construction industrielle des dynamos.

La notion capitale du circuit magnétique, d'où découlent celles de réluctance et de force magnéto-motrice, a permis de la ramener à la même simplicité de forme que la loi d'Ohm, et d'écrire :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}.$$

Sans doute la simplicité n'est pas aussi grande que la forme seule pourrait le faire croire ; mais l'essentiel pour nous a été de préciser chacune des notions physiques qui y figurent, en la rattachant par analogie à une notion antérieurement acquise, en lui donnant une dénomination qui rappelle cette analogie.

Une fois armé de ces formules simples, on peut aborder le calcul proprement dit.

Le premier point est de déterminer les dimensions générales de la machine, ce que nous appelons ses dimensions de carcasse. Celles-ci ne dépendent évidemment que de leur puissance maxima, indépendamment, en gros, des valeurs particulières des facteurs E, I, de cette puissance.

Par une combinaison des formules fondamentales, nous avons pu facilement éliminer ces valeurs et exprimer cette puissance en fonction seulement : des dimensions principales de l'induit (diamètre d, longueur l) ; — de la vitesse à la circonférence v ; — de la densité électrique linéaire δ sur la circonférence de l'induit (ampère-conducteurs par centimètre de circonférence) ; — enfin, de la densité magnétique du champ d'entrefer $\mathcal{H}$.

L'expression générale est :

$$P = A \,.\, dlv \,.\, \delta \,.\, \mathcal{H},$$

formule d'une grande simplicité, où A est un facteur purement numérique.

Nous nous trouvons ainsi en présence de cinq indéterminées, parmi lesquelles v au moins se trouve précisée par des considérations d'ordre purement mécanique. Pour déterminer les autres, nous procédons, *en apparence*, empiriquement, en profitant de remarques

que l'on peut, pour le moment, considérer comme de simples résultats de statistique obtenus par comparaison d'un grand nombre de bonnes machines. On observe, en effet, que, si différentes que soient les dimensions des dynamos à courant continu, si variées leurs applications, certaines relations très sensiblement constantes subsistent entre ces indéterminées. Ainsi, on voit que δ et $\mathcal{H}$ varient très peu, dans la proportion de 3 à 4 seulement, quand la puissance varie de 1 à 50 et plus ; il est donc tout indiqué d'introduire, *a priori*, dans le calcul, des valeurs moyennes de ces quantités. Entre d et l, diamètre et longueur de l'induit, on trouve aussi une relation simple. Pour toutes les machines à deux pôles, on a très sensiblement $d = l$; pour les multipolaires, à $2p$ pôles, on observe $d = lp$ comme relation très générale aussi. Nous la prenons encore comme empirique ; et le problème des dimensions générales se trouve ainsi résolu, au moins pour les dynamos à deux pôles.

L'ordre de polarité n'est lui-même pas arbitraire. On reconnaît vite au calcul que, sur les fortes machines à deux pôles, il devient impossible de satisfaire aux valeurs de δ en usage courant. Pour ne pas s'en éloigner, on est conduit à subdiviser virtuellement la dynamo en un certain nombre d'unités faibles, juxtaposées, et à construire la dynamo multipolaire.

Les dimensions géométriques principales du noyau induit sont ainsi facilement déterminées. Je rappelle seulement pour mémoire que nous devons de toute nécessité feuilleter ce noyau magnétique par des plans parallèles à la direction de propagation du flux de force ; faute de quoi ce flux s'annulerait pour ainsi dire de lui-même par la réaction des courants de Foucault auxquels il donnerait naissance.

Reste à déterminer le bobinage de cet induit. La pratique générale est aujourd'hui de loger les fils induits dans des rainures creusées à même la masse de fer ; mais, comme ce sont assurément des avantages d'ordre purement mécanique qui ont conduit à cette pratique, je n'y insiste pas ici. Le calcul de bobinage résulte de l'application de la formule fondamentale de l'induction électromagnétique. Le nombre n de spires entre balais y est la seule inconnue, puisque f dérive de v et que Φ est déterminé par le produit de la section S du fer induit par l'induction $\mathcal{B}$ à laquelle il est soumis. $\mathcal{B}$ est reliée à $\mathcal{H}$ par une équation de continuité du flux ; elle est donc connue aussi. Enfin la section droite du conducteur de chaque spire se

déduit elle-même de la densité superficielle dans le fil (ampères par millimètre carré), laquelle est liée à la densité périphérique linéaire $\mathfrak{z}$ par une relation de grande simplicité. L'induit est donc ainsi complètement établi. Restent à déterminer les dimensions de l'entrefer et de la carcasse inductrice qui forment le complément du circuit magnétique.

L'entrefer est encore une de ces quantités qui varient très peu avec la dimension des dynamos ; on peut donc en préciser tout d'abord la valeur, sans crainte d'erreur sérieuse, d'après l'expérience acquise.

L'inducteur devra posséder une section de fer déterminée par le flux qui doit le parcourir et l'induction à laquelle on consent à soumettre la matière constitutive, fonte ou fer.

La forme générale, le dessin, de cette carcasse d'inducteur, est le plus souvent arbitraire ; la plus simple est la meilleure. Parfois elle est imposée par la destination même de la dynamo (moteur de traction à monter sur un essieu de véhicule, par exemple) ; il faut alors tirer le meilleur parti possible de la place disponible.

Le bobinage inducteur se détermine par l'application de la loi de l'induction magnétique, mais dont les éléments ont été mis au préalable sous une forme d'application facile. L'assimilation par analogie de la réluctance à la résistance rapproche la conductivité électrique de la perméabilité magnétique; mais, alors que la première peut être considérée comme pratiquement constante, la seconde, au contraire, est loin d'avoir le même caractère et se présente comme une véritable fonction de l'induction.

Ainsi obligés de recourir constamment à des tables de perméabilité, les ingénieurs ont dressé des tableaux qui donnent directement la force magnétisante nécessaire (en ampère-tours par centimètre) pour déterminer une induction $\mathfrak{B}$ donnée dans l'air, dans la fonte, dans les différents fers. On en déduit très simplement les ampère-tours nécessaires pour chaque partie intégrante du circuit magnétique d'après sa longueur propre ; et la sommation de ces ampère-tours définit l'excitation nécessaire. Le partage du produit ampère-tours entre ses constituants, courant magnétisant et nombre de spires, se fait ultérieurement, et d'après les propriétés qu'on veut assurer à la dynamo afin de l'approprier exactement au service industriel auquel elle est destinée.

Le calcul proprement dit de la machine est ainsi achevé. On

reconnaît que, bien qu'il repose sur les principes généraux de la physique, l'empirisme semble encore y prendre une très grande part ; nous avons dû, en effet, choisir arbitrairement δ, $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$ dans l'inducteur, admettre une relation de simple statistique, $d = lp$. Mais j'ai fait remarquer que ces quantités varient très peu, presque pas, avec la dimension des machines ; ce ne peut être là l'effet d'un hasard.

En effet, la constance de ces quantités n'est que la manifestation pratique des conditions imposées par le phénomène fondamental de la *commutation*. Ces conditions de bonne commutation dominent absolument toute l'étude des dynamos à courant continu ; seulement, comme elles ne sont susceptibles d'une expression mathématique ni assez exacte ni assez simple pour pouvoir être introduites directement dans le calcul, on ne les y fait entrer qu'implicitement. La constance de certaines quantités, que nous prenons empiriquement, n'est que la manifestation de ces conditions ; mais nous pouvons ainsi en fixer la valeur dès l'origine du calcul, avec la certitude de choisir des valeurs propres à éviter trop de tâtonnements dans la détermination des autres. D'autres considérations, secondaires au point de vue physique, mais pratiquement importantes, telles que l'économie des matériaux, contribuent aussi à certaines précisions de même nature.

La première partie de la tâche est achevée avec ce calcul de dimensions. Arrivé à ce point, la question que se pose l'ingénieur est la suivante : la machine ainsi calculée est-elle bien appropriée à sa destination ?

Pour résoudre cette seconde partie du problème, nous devrons recourir à des méthodes toutes différentes. Jusqu'ici, pour déterminer des dimensions, nous avons dû établir et résoudre les équations dont elles étaient les inconnues. Mais, pour l'examen des propriétés individuelles de la dynamo projetée, le calcul devient soit insuffisant, soit du moins insuffisamment figuratif pour les besoins de la pratique. Ce que nous devons étudier maintenant, ce sont de véritables fonctions, et nous sommes ainsi conduits à prendre comme instrument de travail leurs représentations graphiques.

Les courbes dites *caractéristiques* ont été d'abord introduites dans l'électrotechnique comme une figuration des conditions variées

du fonctionnement. Leur notion a été, depuis vingt ans, singulièrement étendue et élargie; elles ont été rattachées à la théorie physique elle-même, et ont pu être employées non seulement comme mode de représentation, mais encore comme moyen d'investigation permettant de déterminer à l'avance, d'après le projet, toutes les conditions du fonctionnement dans les conditions les plus variées.

L'étude du fonctionnement met en jeu plusieurs variables : force électromotrice, courant d'excitation, courant extérieur. Il faut naturellement les introduire successivement dans l'étude.

Prenons comme point de départ la représentation de la force électromotrice en fonction de l'excitation, en excitation indépendante, par exemple. On reconnaît immédiatement que cette courbe $E = f(i)$ ne diffère que par un changement d'échelle de $\Phi = f(\mathcal{F})$. Cette première courbe permet de déterminer le bobinage d'excitation par des considérations très simples.

Celui-ci connu, on peut en déduire les conditions de marche en auto-excitation, à circuit ouvert, d'une génératrice excitée en dérivation, d'après ce bobinage.

Il est ensuite possible de passer à la détermination de $E = f(I)$, dont la courbe est la véritable représentation de la loi du fonctionnement industriel. C'est elle qu'il faudra comparer avec la loi idéale imposée par l'application en vue. D'après le résultat de la comparaison, on jugera aisément des retouches que doit subir le projet et de l'approximation que l'on pourra obtenir.

Le constructeur aura ainsi une connaissance de la machine aussi complète qu'il est possible de la déterminer à l'avance.

Il va sans dire que, dans cette suite de déductions, bien des points restent soumis à l'appréciation, et c'est dans l'exacte évaluation de ces indéterminées que réside l'habileté de l'ingénieur.

Assez récemment, on a notablement perfectionné encore le point de départ de ces tracés. On a reconnu qu'il y avait un grand intérêt à décomposer la caractéristique prise ci-dessus comme point de départ, et qui dépend de toutes les pièces du circuit magnétique, en éléments partiels relatifs à certaines d'entre elles seulement. On a pu ainsi étendre l'emploi de ces caractéristiques partielles aux circuits de dispersion eux-mêmes, qui jouent un rôle important dans les conditions finales de fonctionnement. Ainsi l'étude complète des machines, dans sa plus grande généralité, a pu être rattachée entiè-

rement aux trois courbes partielles suivantes, qu'on doit véritablement considérer comme les fondements de l'étude :

Caractéristique de l'inducteur seul ;

Caractéristique de l'entrefer et de l'induit ;

Caractéristique du circuit de dispersion d'inducteur.

Toutes ces courbes sont, évidemment, d'origine magnétique ; leur combinaison permet une représentation très claire, au moyen de tracés graphiques d'une grande simplicité, des conditions du fonctionnement, en partant seulement du dessin de la machine et de la connaissance des propriétés électriques et magnétiques des matériaux.

Ces tracés successifs ne sont d'ailleurs que la traduction des équations déduites de l'application des lois de Kirchhoff aux circuits magnétiques.

On voit par là combien a été féconde pour nous cette notion du circuit magnétique, et combien l'application de la loi d'Ohm et des lois dérivées à cette nature de circuits a jeté de lumière dans l'étude du fonctionnement des dynamos.

Tel est, Messieurs, le parti que les ingénieurs ont tiré des notions physiques fondamentales en ce qui concerne les dynamos à courant continu. Leur construction repose aujourd'hui sur des principes solides, et le fait qu'un état définitif est atteint se trouve attesté par l'identité des machines de tous les constructeurs. Il n'y a plus de systèmes particuliers, et les machines ne diffèrent que par des détails à peu près insignifiants ; les rendements, excellents en valeur absolue, et l'utilisation des matériaux y ont été poussés à l'extrême.

Est-ce à dire que la perfection soit atteinte et que l'avenir ne nous réserve plus aucun progrès ? Certes non. La perfection des machines dynamo-électriques n'est que relative aux conditions présentes de l'industrie. Que celles-ci progressent de leur côté, et la dynamo devra suivre. Or il semble bien que nous sommes précisément à l'aurore d'un tel progrès.

La machine dynamo-électrique n'existe que parce que l'énergie mécanique est la forme la plus économique de toutes les formes supérieures de l'énergie ; elle est donc toujours associée à un moteur, le plus souvent à un moteur spécial. La véritable entité est donc le groupe électrogène, ensemble dont l'étude réclame une collaboration intime du mécanicien et de l'électricien. Si les conditions du moteur

viennent à être modifiées, il est vraisemblable qu'il devra en être de même de celles de la dynamo conjointe.

Or les progrès de la métallurgie, depuis quelques années, ont mis à la disposition des mécaniciens des matériaux dont la ténacité, exceptionnellement élevée, a permis de dépasser d'une quantité énorme les vitesses linéaires de 20 à 25 m : sec, qui formaient la limite pratique de la mécanique vingt-cinq années en arrière.

Les mécaniciens ont ainsi pu réaliser, dans d'admirables conditions, la vieille idée de la turbine à vapeur, et offrir aux électriciens des moteurs extrêmement puissants sous de petits volumes, mais animés de vitesses angulaires très élevées, comportant des valeurs de la vitesse linéaire à la circonférence de 100 à 150 m : sec, par exemple. L'attelage de dynamos à courant continu sur de tels moteurs présente les plus grandes difficultés ; pour n'en signaler qu'une d'ordre purement électrique, la commutation devient excessivement pénible parce que trop rapide, malgré l'emploi de tous les artifices favorables connus. Les quelques réalisations de groupes électrogènes ainsi constitués qui ont été ainsi faites pendant ces dernières années ont surtout servi à démontrer que la dynamo continue à collecteur est mal appropriée aux qualités de ces moteurs nouveaux. Il faut donc chercher autre chose.

Les électriciens ont alors, eux aussi, repris une vieille idée, celle des machines dites unipolaires. Ce type de dynamo, dépourvu de collecteur, mal approprié aux faibles vitesses de l'industrie, n'avait reçu que de très rares et très spéciales applications ; aujourd'hui, il semble reprendre la supériorité pour l'emploi aux très grandes vitesses, précisément là où la dynamo à collecteur se trouve inférieure à elle-même. C'est dans cette voie que sont orientées en ce moment des recherches nouvelles ; elles sont encore trop récentes pour avoir pu donner autre chose que des promesses ; mais elles pourraient très bien ouvrir une voie nouvelle au développement des dynamos à courant continu.

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUSTRIE ;

Par M. A. Hillairet [1].

Les moteurs électriques se divisent en deux catégories, suivant qu'ils sont alimentés par du courant continu ou par du courant alternatif.

MOTEURS A COURANT CONTINU.

Au point de vue de leur emploi, ces moteurs sont caractérisés avant tout par leur mode d'excitation, qui peut être :

1° En série ;
2° En dérivation ;
3° Mixte ou compound.

1° Dans l'excitation en série, qui est la plus anciennement connue, le circuit des inducteurs est parcouru par le courant total de l'induit. Il en résulte une apparence complexe pour l'expression qui représente le couple moteur en fonction de l'intensité. En réalité, cette expression se simplifie et prend une forme linéaire dans les limites pratiques.

Si on alimente sous une tension constante un moteur excité en série, on voit que la vitesse est fonction de l'intensité, ou, si on veut, du couple moteur ; la force contre-électromotrice, proportionnelle au flux magnétique balayé par les spires dans l'unité de temps, varie avec l'induction et avec la vitesse. Si la résistance intérieure de l'induit et des inducteurs est très faible relativement, comme dans les dynamos actuelles, le produit du flux qui traverse l'induit par la fréquence varie peu : il en résulte que les deux dernières quantités varient sensiblement en sens inverse l'une de l'autre, quand la tension est maintenue constante aux bornes.

En conséquence, les moteurs excités en série auront une excitation croissante avec le couple résistant et leur vitesse, sous tension constante, variera avec le couple résistant, mais en sens inverse.

Les cas de la pratique auxquels conviennent ces moteurs nécessitent un réglage à chaque instant, par l'intermédiaire d'un appareil

---

[1] Conférence faite le 16 mai 1905.

spécial (traction, appareils de levage), à moins que les emballements ne soient pas à craindre (couple résistant fixe ou croissant avec la vitesse, pompes centrifuges, ventilateurs, propulseurs pour bateaux).

Si un couple énergique doit être exigé au démarrage (traction, manœuvres intermittentes à effort variable), ce mode d'excitation est particulièrement favorable.

Mais il faut le bannir dans le cas fréquent où on exige une vitesse constante avec un couple résistant variable (conduite des transmissions d'ateliers et usines).

2° Les moteurs dont les inducteurs sont excités en dérivation sont destinés à être alimentés sous une tension qu'on s'efforce de maintenir aussi fixe que possible; il en résulte que l'intensité du courant d'excitation est maintenue à la même fixité et de même la force magnétomotrice.

Si l'induit du moteur tourne complètement à vide, entraîné par un courant d'intensité relativement négligeable, comme il arrive dans les machines actuelles, la force contre-électromotrice est sensiblement égale à la tension aux balais, c'est-à-dire aux bornes mêmes de la dynamo.

Si on charge le moteur, la force contre-électromotrice s'abaisse au-dessous de la tension aux balais d'une quantité égale à la perte de charge dans l'induit.

Or celle-ci ne peut dépasser, en régime continu, une valeur représentée par quelques centièmes de la tension d'alimentation : il en résulte directement que la vitesse du moteur en charge ne peut différer normalement de la vitesse à vide que de quelques centièmes.

Si on calcule, pour un moteur donné, cette différence des vitesses à vide et en charge et si on vérifie expérimentalement le résultat de ce calcul préalable, on trouve une concordance très satisfaisante, et même quelquefois un écart des vitesses un peu moindre que le calcul ne l'indique; ce dernier cas correspond aux dynamos ayant une réaction d'induit appréciable qui tend à affaiblir le flux inducteur à mesure que l'intensité du courant augmente. Cette diminution du flux donne lieu à un léger relèvement de la vitesse au-dessus de la valeur qu'atteindrait celle-ci avec un induit sans réaction [1].

---

[1] La constance absolue de la vitesse, quelle que soit la charge, peut être obtenue par l'emploi d'un circuit auxiliaire disposé sur les inducteurs, parcouru par le courant principal et donnant lieu à une force magnétomotrice inverse de la force

En résumé, dans la pratique, le moteur à inducteurs excités en dérivation, fonctionnant sous tension constante, est considéré comme moteur à vitesse constante.

Dans tous les cas où cette dernière condition est imposée avec le courant continu, l'emploi de ce type de moteur est déterminé (transmissions générales d'usines et ateliers).

On arrive ainsi facilement à un coefficient de régularité de 2 à 5 0/0, sans l'emploi d'aucun organe de réglage.

3° L'excitation mixte ou compound est une combinaison des deux modes d'excitation précédents : les inducteurs d'un même moteur reçoivent dans ce cas deux circuits, dont l'un est en dérivation aux bornes, et l'autre en série avec l'induit.

L'allure d'un tel moteur, en fonction de la charge et sous tension constante, participe à la fois de l'allure du moteur excité en série et de l'allure du moteur excité en dérivations, dans telle proportion qu'on veut, suivant la force magnétomotrice qu'on attribue à chacun des deux circuits inducteurs.

Un moteur à excitation compound ne s'emballera pas à l'excès à vide, mais sa vitesse baissera sensiblement quand la charge augmentera ; on pourra calculer les enroulements inducteurs suivant un coefficient d'emballement donné (1).

Le démarrage de ces moteurs est facilité par l'enroulement en série des inducteurs, dont la force magnétomotrice est de même sens que celle de l'enroulement en dérivation ; on peut mettre ces moteurs en marche sans avoir à exciter au préalable l'enroulement en dérivation.

Ces moteurs sont donc employés dans les cas où la vitesse peut varier entre certaines limites avec la charge et quand on veut mettre en marche, à distance, des machines dont la vitesse ne doit pas devenir excessive à vide.

Procédés de mise en marche. — L'emploi de rhéostats avec com-

---

magnétomotrice due au circuit inducteur en dérivations ; cette disposition, connue depuis longtemps, est peu employée : elle n'est pas pratiquement nécessaire et peut donner lieu à un renversement du sens de la marche au démarrage, si celui-ci est effectué trop brusquement.

(1) Il est quelquefois intéressant d'obtenir des vitesses croissant naturellement quand le couple résistant diminue (allures variées des machines à travailler le bois, appareils de levage à charge variable, etc.).

mutateurs est général pour la mise en marche des moteurs. L'étendue des résistances et leur fractionnement varient suivant les applications.

Les rhéostats à liquides légèrement salins (carbonate de soude, par exemple) pour les basses tensions, et à eau pure pour les hautes tensions, peuvent présenter telle étendue qu'on veut, avec un fractionnement infinitésimal, sauf au contact des lames où il se produit une variation brusque de résistance qu'on s'efforce de rendre aussi faible que possible (éviter la formation d'un arc au sein du liquide).

Ces rhéostats sont d'un usage courant : leur prix est peu important et leur entretien élémentaire.

La valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau permet des mises en marche assez lentes.

On se sert de ces appareils pour les plus faibles comme pour les plus puissants moteurs. On en a disposé sur des locomotives à basse tension et sur des locomotives à haute tension, avec du courant continu comme avec du courant alternatif.

Les rhéostats uniquement métalliques sont peut-être plus répandus ; une construction d'apparence plus mécanique que celle des appareils précédents leur assure une certaine faveur des praticiens, bien que celle-ci ne soit pas toujours justifiée.

La faible chaleur spécifique du métal, le développement des surfaces qui en résulte pour assurer la dissipation de l'effet Joule, le fractionnement nécessairement limité des éléments de résistance, sont autant de difficultés qui compliquent l'établissement des rhéostats de simple démarrage (dans les résistances desquels le courant ne passe que pendant un temps faible et déterminé à l'avance) ou de réglage, plus développés que les précédents (le courant pouvant être établi pendant un temps illimité dans tout ou partie des résistances).

Le fractionnement a pu être réduit par l'usage du soufflage magnétique entre les touches du commutateur : les arcs de rupture sont chassés normalement au flux magnétique d'un électro-aimant parcouru par le courant lui-même ou par une dérivation (dispositif issu de l'ancien chalumeau électrique des laboratoires).

Les métaux les plus employés dans la construction des rhéostats sont le fer, le cuivre et des alliages variés de nickel, dont le maillechort en tête. Le fer et le cuivre ont des coefficients de température élevés; leur résistance est donc très variable avec la température.

Le fer s'oxyde, dans certains milieux, avec une grande rapidité (émanations de vapeurs acides, voisinage de la mer).

Le maillechort ne s'oxyde pas : son coefficient de température est faible et sa résistivité élevée. Le ferro-nickel est à rejeter en général, malgré sa grande résistivité, car il s'oxyde et devient fragile.

Sauf de très rares exceptions, les appareils de démarrage des tramways et locomotives électriques comportent des rhéostats métalliques avec soufflage magnétique aux touches de contact. Certains appareils supportent jusqu'à 3 ou 4.000 ampères au démarrage sous 6 à 700 volts.

Toutefois, avec des intensités aussi importantes, on a songé à faire produire une tension graduellement croissante pour les démarrages directement par la génératrice, dont l'excitation est portée graduellement de 0 à son taux maximum. Cette solution ne peut convenir que quand une réceptrice correspond à une seule génératrice. Dans le cas où une receptrice est alimentée par un réseau de distribution, si on veut obtenir le même résultat, on intercale en série sur la dérivation correspondante une dynamo à vitesse maintenue constante et dont la tension peut varier graduellement d'un maximum positif à un maximum négatif (rhéostat d'excitation et inverseur du courant d'excitation) ; au maximum négatif correspond une tension nulle aux bornes de la réceptrice, et au maximum positif, la tension maxima d'alimentation : une telle dynamo est dite survolteur, sous-volteur ou dévolteur.

On a appliqué ce procédé à des machines d'extraction : la puissance maxima que peuvent exiger celles-ci atteint souvent des valeurs élevées (plus de 1.000 kilowatts par exemple) et leur régime est périodiquement variable.

Freinage électrique. — Quand on coupe le courant qui alimente l'induit d'une réceptrice lancée à une certaine vitesse, celle-ci décroît immédiatement. L'amortissement est moins rapide si on a supprimé l'excitation que si on la maintient ; dans ce dernier cas, les courants développés dans le fer de l'induit ainsi que l'hystérésis donnent lieu à un couple retardateur qui vient s'ajouter au couple des résistances passives d'ordre mécanique.

Si, après avoir séparé l'induit du réseau, on réunit ses balais par une résistance, l'excitation étant maintenue (excitation en dérivation par exemple), la dynamo fonctionne en génératrice sur cette résis-

tance et le couple retardateur est accru d'une quantité facile à calculer à chaque instant [1]. On réalise ainsi le freinage électrique.

Si on veut freiner un moteur excité en dérivation, il n'y a d'autre précaution à prendre que de maintenir l'excitation tout le temps que les balais sont reliés par la résistance; s'il s'agit d'un moteur excité en série, il faudra, au moment du freinage, intervertir les connexions des inducteurs avec les balais, sinon la dynamo ne s'amorcerait pas, et enfin, pour un moteur à enroulement mixte ou compound, on supprimera, pour simplifier, le gros fil du circuit des balais et on ne maintiendra l'excitation que dans le fil fin, c'est-à-dire dans l'excitation en dérivation.

Le freinage électrique est d'autant plus actif que la résistance intercalée entre balais est plus faible, et la vitesse de rotation plus élevée. Quand celle-ci tend à s'annuler, on réduit jusqu'à l'annuler la résistance entre les balais. Ceux-ci sont généralement en court-circuit à la fin du freinage.

On fait usage du freinage électrique dans la traction, dans les appareils de levage et dans le cas où on veut obtenir des arrêts précis (ascenseurs, pointage des canons).

---

(1) La loi de l'amortissement du freinage électrique s'établit comme la loi d'amortissement du cadre du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

Dans le cas simple idéal, où il n'y aurait d'autre couple retardateur que celui qui provient du courant passant dans la résistance entre balais, on obtient la loi:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{e^{\frac{1}{MR^2} \cdot \frac{1}{\Sigma\rho} \cdot \left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right) \cdot t}}.$$

ω_0, vitesse angulaire initiale à partir de laquelle a commencé le freinage ;
ω, vitesse angulaire à l'époque t à partir du commencement du freinage ;
e, base des log. nép. ;
MR^2, moment d'inertie du système tournant ;
$\Sigma\rho$, résistance du circuit de l'induit ;
n, nombre de spires ou cadres en série de l'induit ;
Φ, flux traversant l'un des cadres.

Dans le cas plus voisin de la pratique où, au couple retardateur précédent, essentiellement variable, il y a lieu d'ajouter un couple retardateur constant P, on obtient la loi :

$$\frac{\dfrac{\left(\dfrac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right)^2 \omega}{\Sigma\rho} + P}{\dfrac{\left(\dfrac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right)^2 \cdot \omega_0}{\Sigma\rho} + P} = \frac{1}{e^{\frac{1}{MR^2} \cdot \frac{1}{\Sigma\rho} \cdot \left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right) \cdot t}}.$$

dont la précédente est naturellement un cas particulier, celui où $P = 0$.

La facilité avec laquelle s'amorce ce freinage en rend quelquefois l'effet brutal : aussi, actuellement, dans la traction, on ne le conserve que comme freinage d'urgence et on ne l'applique qu'après les autres procédés ordinaires.

D'autre part, en graduant convenablement la résistance de freinage, et en ne la faisant varier que doucement, on obtient des arrêts qui conviennent mieux à certaines manœuvres que les arrêts produits par les autres procédés, la quantité principale du couple retardateur ne dépendant pas d'un coefficient de frottement plus ou moins variable, mais uniquement de quantités fixes (champ magnétique, résistances ohmiques).

Procédés de distribution. — La distribution en dérivation (en quantité ou en parallèle) sous tension fixe — ou du moins pratiquement fixe — est de beaucoup la plus répandue, soit sous sa forme la plus simple (deux conducteurs correspondant chacun à l'un des pôles), soit sous des formes plus compliquées (distribution à conducteurs multiples, à plusieurs ponts égaux ou inégaux).

Ce dernier procédé consiste dans l'emploi d'une série de génératrices de tensions égales ou inégales, associées en série (ou tension) et aux bornes desquelles aboutissent des conducteurs qui cheminent parallèlement sur tout le parcours du réseau. Chaque point du réseau peut donc être alimenté sous les n tensions que distribuent les $n + 1$ conducteurs.

La gamme des tensions les plus usuelles donne au total un multiple de 110 ou 120 volts; le nombre des ponts dépasse rarement 4 correspondant à 5 conducteurs.

On trouve, par exemple, des distributions à $120 \times 2 = 240$ volts et d'autres à $120 \times 4 = 480$ volts.

La distribution à ponts multiples devrait être plus répandue qu'elle ne l'est actuellement pour l'alimentation des réceptrices. Elle permet, en effet, d'obtenir pour celles-ci des vitesses variées sans l'introduction d'aucun rhéostat en série avec les induits. Ce procédé est donc, au point de vue électrique, l'équivalent du procédé mécanique des cônes étagés que possèdent la plupart des machines-outils

Ces cônes peuvent et doivent disparaître dans les établissements alimentés par un réseau à plusieurs tensions.

Les tensions étagées d'un même réseau peuvent être inégales : on

peut réaliser par exemple une distribution à deux ponts comportant

Un pont à.....	120 volts
Et un pont à....	240 —

On aura ainsi à sa disposition :

Premier pont.....	120 volts
Deuxième pont.....	240 —
Ensemble.....	360 volts

soit trois tensions pour deux ponts et trois conducteurs seulement.

Nous avons réalisé ce mode de distribution dans plusieurs usines depuis une dizaine d'années.

Avec l'emploi de ces deux ponts inégaux, le passage de 240 à 360 volts sans inversion de polarité complique un peu les appareils de mise en marche ; l'emploi de ponts égaux donne lieu à des appareils plus simples.

Nous ne pouvons passer sous silence les distributions en série, qui ne sont que l'exception si on les compare aux précédentes, parce qu'elles entraînent des sujétions la plupart du temps prohibitives, mais elles ont des propriétés intéressantes qu'il importe de faire entrevoir rapidement.

Dans les distributions en série, c'est-à-dire à intensité constante, la puissance fournie aux bornes de chaque moteur est proportionnelle à la tension entre les mêmes bornes.

Pour mettre en marche un moteur, on l'intercale brutalement dans le circuit. Rien de plus simple. Il n'en est pas de même pour le réglage de l'allure en régime normal : s'il s'agit par exemple de maintenir la vitesse sensiblement constante quand le couple moteur varie, on n'y réussira qu'en agissant sur la force magnétomotrice, c'est-à-dire sur les ampères-tours des inducteurs, soit à la main, soit au moyen de systèmes automatiques.

On peut modifier les ampères-tours des inducteurs soit en shuntant ceux-ci par des résistances, soit en modifiant le nombre des spires actives des solénoïdes, divisés à cet effet en un certain nombre de sections ou galettes. Pour maintenir la vitesse constante, le seul système automatique qui convienne a comme organe principal un régulateur centrifuge (tachymètre). Ce régulateur agit, soit sur les résistances d'un shunt, soit sur les sections ou galettes des solénoïdes.

Ces systèmes automatiques doivent être étudiés et construits avec le plus grand soin, car ils ont à fonctionner au voisinage de l'instabilité (d'où emploi de volants supplémentaires sur les arbres des moteurs).

Le principe des distributions en série a été indiqué par M. Marcel Deprez, en 1880; en fait, des distributions par ce système n'ont été réalisées avec succès que par M. Thury, dix ans plus tard.

Si les moteurs insérés dans une distribution en série actionnent des récepteurs dont le couple résistant augmente avec la vitesse, il n'est pas besoin de régulateurs pour en fixer l'allure : celle-ci est naturellement stable.

C'est par exemple le cas des ventilateurs, pompes centrifuges et hélices. Les moteurs convenablement calculés pour ces applications prennent d'eux-mêmes leur vitesse de régime, sans oscillations, dans un circuit à intensité constante. On voit sans peine comment se produisent l'amortissement et la stabilité.

Les moteurs d'une distribution en série, n'étant alimentés que par une fraction de la tension totale aux bornes des génératrices, ne présentent pas de difficultés de construction au point de vue des isolements : il suffit d'en soigner l'isolement par rapport à la terre (montage sur isolateurs en porcelaine ou en verre).

En pratique, les distributions en série ne tendent à se développer qu'avec les unités génératrices et réceptrices importantes (alimentation de moteurs de sous-stations).

MOTEURS A COURANT ALTERNATIF.

1° Moteurs synchrones à simple phase;
2° Moteurs synchrones polyphasés;
3° Moteurs asynchrones polyphasés;
4° Moteurs asynchrones à simple phase;
5° Moteurs à collecteur en série;
6° Moteurs à répulsion;
7° Moteurs compensés.

1° Moteurs synchrones a simple phase. — 1° Tout alternateur à simple phase peut fonctionner comme moteur si on alimente son induit avec un courant alternatif de tension efficace appropriée.

Ce fonctionnement ne peut être obtenu que :

1° Si la partie mobile de l'alternateur a été au préalable amenée par un autre moteur quelconque à une vitesse angulaire correspondant à la fréquence du courant;

2° Si les inducteurs ont été convenablement excités par du courant continu;

3° Si le couplage de l'induit avec la ligne n'a été opéré que lorsque la force électromotrice de cet induit est rigoureusement en opposition de phase avec la tension qui doit lui être appliquée.

L'époque favorable au couplage est annoncée par un indicateur de coïncidence et d'opposition de phases.

La mise en marche effectuée, si le fonctionnement est stable, la vitesse de la partie mobile de l'alternateur se maintient rigoureusement à la valeur fixe que lui assignent le nombre de ses pôles et la fréquence du courant d'alimentation : c'est le synchronisme absolu non seulement pour chaque tour de la partie mobile, mais pour chaque fraction de tour correspondant à un espace interpolaire.

Dans le parcours de cette dernière fraction de tour, le synchronisme n'est plus absolu : le mouvement de la partie mobile éprouve de légers balancements qui l'écartent du mouvement uniforme. Ces balancements peuvent être négligeables ; ils peuvent se produire, puis s'atténuer; enfin, d'abord négligeables, ils peuvent s'accroître régulièrement sous l'influence d'une action répétée, même très faible, mais dont l'effet s'accorde avec l'ensemble du système.

Dans les deux premiers cas, le fonctionnement est stable ; dans le troisième, il est instable, et la partie mobile de l'alternateur s'arrête dès que le synchronisme est rompu au delà du parcours d'un espace interpolaire.

La valeur du couple d'un tel moteur à simple phase a une allure naturellement pulsatoire.

La possibilité du fonctionnement des alternateurs en moteurs synchrones a été indiquée par J. Hopkinson à la suite des essais qu'il entreprit en 1883 sur les machines magnéto-électriques de Meritens, qui alimentaient les feux du phare du South-Foreland.

Ces essais montrèrent la possibilité de l'accouplement des alternateurs en parallèle, puis du fonctionnement des alternateurs comme il vient d'être dit [1].

L'emploi d'un moteur synchrone nécessite donc :

---

[1] Les machines magnéto-électriques sur lesquelles opéra J. Hopkinson étaient aussi peu appropriées que possible à ces deux modes de fonctionnement.

Une mise en vitesse préalable au moyen d'un moteur auxiliaire quelconque;

Une excitation préalable des inducteurs avec du courant continu;

Une vérification de l'opposition des phases;

Puis, en dehors de la puissance normale à réaliser, une stabilité d'allure absolue.

Il est souvent difficile, et quelquefois pratiquement impossible, de satisfaire à ces conditions, et de subir, en plus, le synchronisme absolu ou l'arrêt brusque en cas de surcharge ou de résonance: aussi ces moteurs sont-ils peu répandus.

Dans le cas où ils sont attelés sur la transmission d'un atelier déjà conduite par un autre moteur, celui-ci est utilisé pour la mise en vitesse, qui ne présente plus de difficultés : il y a des exemples de cette application [1]. Enfin, un moteur synchrone branché en dérivation sur un réseau peut, dans certaines conditions d'excitation et de charge, donner lieu à un courant décalé en avant, et jouer le rôle de condensateur en améliorant le facteur de puissance du réseau.

On emploie quelquefois, dans les postes de transformation des distributions d'énergie, des moteurs synchrones à haute tension pour commander des génératrices à courant continu à basse tension. Un tel groupe est dit « moteur-générateur ». Sa mise en marche est effectuée par le courant continu.

Les commutatrices ou convertisseurs de courant alternatif en courant continu sont des moteurs synchrones, mais qui n'absorbent pour l'entretien de leur mouvement qu'une faible fraction de l'énergie qu'ils reçoivent à leurs bornes.

2° Moteurs synchrones polyphasés. — Tout alternateur à phases multiples ou polyphasé peut fonctionner comme moteur, si on alimente son induit avec une série de courants alternatifs de même fréquence, de tension efficace convenable, et présentant entre eux une équidistance de phase appropriée.

L'induit doit, en conséquence, comporter autant de circuits séparés

---

[1] Celle-ci a donné lieu à un accident qu'il est bon de signaler et qui s'est produit à Engins (Isère).

Un défaut étant survenu à une ligne qui, entre autres moteurs, alimentait un moteur synchrone attelé à la transmission d'une fabrique de papiers, les interrupteurs furent levés à l'usine génératrice. Un ouvrier envoyé pour réparer le défaut fut foudroyé au premier contact. La ligne était encore sous tension du fait du fonctionnement du moteur synchrone en alternateur conduit par le moteur de l'usine, l'excitation n'ayant pas été coupée, faute d'avis.

qu'il y a de courants d'alimentation. Ces circuits sont répartis régulièrement autour de l'axe de rotation : l'induit est, à proprement parler, un groupement, sur un même support magnétique, d'autant d'induits qu'il y a de courants.

Le flux engendré à chaque instant par la combinaison des forces magnétisantes de ces courants est constant et tourne à un nombre de tours par seconde identique au nombre qui exprime la fréquence si chaque alternateur élémentaire est bipolaire ; s'il y a plus de deux pôles, le nombre de tours par seconde effectué par le flux résultant a pour expression le quotient de la fréquence par le nombre de paires de pôles de chaque alternateur élémentaire.

Imaginons un alternateur polyphasé de faibles dimensions, à induit fixe et dont on aurait enlevé le système inducteur : si à la place de celui-ci on dispose une aiguille aimantée suspendue sur un axe, puis si, après avoir lancé au préalable, cette aiguille à une certaine vitesse, on alimente les circuits de l'alternateur, l'aiguille prendra un régime de vitesse uniforme déterminé par la fréquence des courants et le nombre des pôles. On aura ainsi un moteur synchrone polyphasé élémentaire.

Si on remet à sa place le système inducteur, et si, après avoir lancé celui-ci à une vitesse suffisante, on l'excite par du courant continu, puis si on alimente les circuits de l'alternateur, on peut obtenir un mouvement de rotation continu ; le moteur synchrone polyphasé est constitué.

Le couple développé à chaque instant par un tel moteur n'a pas le caractère pulsatoire, dû à la périodicité du courant, que nous avons signalé pour le moteur synchrone à simple phase.

Si, toutefois, au cours de chaque demi-période, le couple varie légèrement, cette variation est due à des balancements de la partie mobile de part et d'autre de son mouvement moyen.

Comme pour le moteur à simple phase, si ces balancements ne peuvent s'amortir et s'amplifient, il y a une limite à partir de laquelle le couple de rappel devient insuffisant, et la partie mobile s'arrête en provoquant une élévation exagérée de l'intensité des courants dans l'induit.

Le même arrêt subit peut se produire par l'effet d'une surcharge, sans balancements préalables.

Les moteurs synchrones polyphasés sont plus répandus que les moteurs synchrones à simple phase.

Leur mise en marche peut être effectuée soit par un moteur auxiliaire électrique ou autre, soit par le moyen d'un circuit auxiliaire de forme rudimentaire (cage d'écureuil), disposé à la périphérie des inducteurs, et dans lequel le flux tournant induit un courant ; ce circuit tend à suivre la rotation du flux en entraînant les inducteurs, et, à une vitesse voisine du synchronisme, on peut, en excitant ceux-ci, mettre en régime synchrone ou *accrocher* la partie mobile.

Les réseaux qui ont surtout pour objet la distribution de l'énergie sous forme mécanique sont jusqu'à présent à courants polyphasés et non à simple phase.

Les moteurs synchrones polyphasés sont plus légers (de 15 à 20 0/0 environ) que les moteurs synchrones à simple phase. On peut les adapter partout où convient une vitesse constante, pour les transmissions d'atelier en particulier, et les accoupler aussi avec d'autres moteurs sur une même transmission (facilité de mise en marche).

Ils peuvent agir pour améliorer le facteur de puissance d'un réseau. On les utilise fréquemment dans les postes de transformation, comme moteurs-générateurs.

Enfin les commutatrices ou convertisseurs de courants alternatifs polyphasés en courant continu sont des moteurs synchrones d'un fonctionnement particulier.

3° Moteurs asynchrones polyphasés. — Si, dans un moteur du type précédent (synchrone polyphasé), on remplace le système d'électro-aimants à courant continu par une armature en fer munie de circuits élémentaires convenablement disposés et fermés sur eux-mêmes, le flux tournant induit un courant alternatif dans chacun de ces circuits, et l'action de ces courants sur le flux peut donner naissance à un couple.

L'armature tend à suivre le flux : si le couple résistant était rigoureusement nul, l'armature suivrait le flux sans glissement.

A mesure que le couple résistant augmente, le glissement s'accroît jusqu'à une limite à partir de laquelle l'armature s'arrête.

Cette limite du décrochement est due à l'exagération des courants induits dans l'armature et qui réagissent sur le flux inducteur.

Ce phénomène ne permet pas aux moteurs ayant des armatures

constituées comme il est dit ci-dessus de démarrer en charge.

En 1890, M. Maurice Leblanc eut l'idée de réunir ces circuits élémentaires entre eux, puis à des bagues isolées et montées sur l'arbre, et, par ce moyen, d'introduire dans les circuits des résistances non inductives, lors du démarrage, quand le glissement est maximum. On peut ainsi maintenir les courants induits dans l'armature au-dessous de telle limite qu'on veut, avec un décalage minimum par rapport à la force électromotrice engendrée par le flux tournant.

Le couple au démarrage peut ainsi atteindre la même valeur maxima que quand l'armature a atteint son régime de vitesse, après suppression des résistances et mise en court-circuit des circuits de l'armature.

Le procédé de M. Maurice Leblanc est universellement adopté pour le démarrage des moteurs polyphasés asynchrones.

M. Boucherot, plus récemment (1896), a imaginé et réalisé deux procédés de démarrage en charge [1].

L'un de ces procédés consiste à disposer sur une même armature induite deux ou plusieurs [2] enroulements de constantes de temps très différentes (un enroulement possédant une résistance élevée avec une faible self-induction, un autre enroulement avec une résistance moindre et une self-induction plus élevée, et les autres enroulements comportant une diminution graduelle de la résistance avec un accroissement graduel de la self-induction).

Le couple de démarrage est fourni naturellement par l'enroulement le plus résistant et le moins inductif et le couple à l'allure normale par l'enroulement le moins résistant et le plus inductif. Les moteurs ainsi établis peuvent donc démarrer en charge, et être mis en marche à distance, par la simple fermeture du circuit inducteur.

L'autre procédé de M. Boucherot consiste dans l'emploi de deux systèmes inducteurs agissant sur deux armatures induites juxtaposées, montées sur le même arbre et dont les enroulements sont couplés en parallèle à demeure sur une résistance non inductive (les génératrices des deux enroulements aboutissant à une bague de maillechort formant résistance). L'un des deux systèmes inducteurs peut être déplacé angulairement autour de l'axe commun, de telle

---

(1) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, p. 68 et suiv. ; 1898.
(2) Trois constituent un maximum pratique.

façon que les courants engendrés dans les induits peuvent être de sens contraires, de même sens ou de sens relativement variables entre ces extrêmes.

Quand les courants sont en opposition (sens contraire), la bague de maillechort leur fournit une dérivation non inductive : on a ainsi la position qui donne le couple maximum de démarrage. Celui-ci une fois effectué, on donne graduellement à l'inducteur mobile la position qui induit des courants de même sens dans les deux armatures. Dans cette dernière position la bague de maillechort, réunissant des points à chaque instant au même potentiel, n'est parcourue par aucun courant, et la faible fréquence du glissement n'induit pas un courant exagéré dans l'armature : le régime normal est établi.

Par suite du déplacement de l'un des systèmes inducteurs, la mise en marche à distance n'est pas réalisable.

Toutefois, à ce déplacement matériel peut être substitué, dans certains cas (démarrages faciles), un changement de polarité des enroulements par simple inversion des connexions de ceux-ci. Cette inversion fait franchir d'un coup un pas polaire aux polarités. Ce dispositif, qui n'est pas toujours admissible, permet la mise en marche à distance.

La mise en marche effectuée, et l'allure de régime atteinte, la vitesse angulaire d'un moteur asynchrone ne varie que de quelques centièmes entre la marche à vide et la marche à la charge limite du décrochement. Complètement à vide, le moteur tournerait au synchronisme du courant d'alimentation ; en charge croissante, le moteur s'écarte de ce synchronisme d'un glissement croissant qui ne dépasse pas l'ordre de grandeur indiqué plus haut.

Il en résulte que tout moteur asynchrone fonctionne normalement à une vitesse pratiquement constante.

L'introduction de résistances non inductives dans les circuits d'un induit polyphasé par l'intermédiaire de bagues, suivant leprocédé de M. M. Leblanc, permet de faire varier la vitesse de cet induit depuis le repos jusqu'à l'allure maxima.

Mais ce procédé n'est pas économique ; il est, quant à la consommation d'énergie dissipée en pure perte qui en résulte, rigoureusement analogue au procédé de démarrage par rhéostat des moteurs à courant continu.

Il n'est donc applicable qu'aux variations de courte durée, comme celles auxquelles donnent lieu les démarrages.

Il existe d'autres procédés moins onéreux, c'est-à-dire donnant lieu à un meilleur rendement, mais ces procédés ne sont ni simples ni complètement satisfaisants.

Le plus ancien de ces procédés consiste à modifier le nombre des pôles de l'inducteur par un changement de couplage des enroulements. On peut, par exemple, par le simple jeu des connexions, réduire de 16 à 8 les nombres des pôles d'un moteur et doubler ainsi la vitesse angulaire du champ tournant inducteur.

Un autre procédé plus récent consiste à coupler de diverses façons les éléments inducteurs et induits de deux moteurs reliés mécaniquement (calés sur le même arbre ou accouplés par engrenages). Le cas le plus simple de ce procédé est celui où l'induit de l'un des moteurs A est relié électriquement à l'inducteur de l'autre moteur B, les deux induits étant calés sur le même arbre, et les deux inducteurs comportant respectivement le même nombre de pôles. On voit ce qui se passe dans ce couplage en cascade : l'inducteur de A reçoit son courant de la ligne, et son champ entraîne l'induit, qui se comporte comme un générateur de courant alternatif polyphasé à la fréquence du glissement. Ce courant polyphasé alimente l'inducteur de B, dont le flux entraîne l'induit correspondant. Les induits de A et de B étant calés sur le même arbre ont nécessairement à chaque instant même vitesse angulaire absolue : d'où l'équation de condition qui donne pour la valeur de la vitesse commune un peu moins que la moitié de la vitesse qui correspondrait au synchronisme des courants de la ligne. Si les deux moteurs n'ont pas respectivement le même nombre de pôles, la vitesse résultante est exactement celle qu'on obtiendrait, toutes conditions égales d'ailleurs, avec un moteur unique ayant un nombre de pôles égal à la somme algébrique des pôles des deux moteurs.

On comprend donc qu'on puisse ainsi réaliser différents couplages, donnant lieu à différentes vitesses.

Les locomotives électriques du chemin de fer de la Valteline [1] (Italie) comportent sur chacun de leurs bogies ou trucks deux moteurs dont l'un a son inducteur toujours alimenté par la ligne et dont l'autre a son inducteur alimenté par l'induit du premier lors des démarrages et pour les faibles vitesses. Des résistances introduites dans les circuits des enroulements du deuxième induit, au moyen de bagues et

---

[1] *Société internationale des Électriciens*, p. 96 et suiv. ; 1903.

de frotteurs, permettent d'abaisser la vitesse à telle valeur qu'on veut.

Pour marcher à la vitesse maxima, on supprime le couplage en cascade et on met peu à peu en court-circuit l'induit du premier moteur ; le deuxième moteur reste alors inutilisé. L'invention de ce mode de couplage est attribuée à M. Goerges.

Enfin on peut alimenter un moteur donné par des courants de fréquences variées et appropriées aux vitesses qu'on veut obtenir.

Dans ce but, il faut disposer de différentes sources de courant polyphasé à différentes fréquences et sous des tensions proportionnelles respectivement à ces fréquences.

En fait, la question de prix de premier établissement étant mise à part, il n'y a aucune difficulté à établir dans une usine des alternateurs de fréquences différentes et des lignes séparées pour les desservir. Si les démarrages des moteurs sous charge sont répétés et si les allures doivent être constamment variées, il peut y avoir avantage à adopter ce dispositif, qui est l'équivalent du système à tensions étagées que nous avons indiqué pour le courant continu. M. Boucherot a employé à la sucrerie d'Escaudœuvres, près Cambrai, les trois fréquences 21, 35 et 50 pour la mise en marche (et le freinage) des moteurs des essoreuses [1].

On peut freiner électriquement avec un moteur asynchrone, mais dans des conditions étroites, à une allure très voisine du synchronisme, et en laissant l'inducteur relié à la ligne.

M. Maurice Leblanc a le premier indiqué que, dans ces conditions, le moteur entraîné devient une génératrice asynchrone de courant alternatif ; le couple résistant qu'elle oppose à l'entraînement donne la mesure du freinage.

Une locomotive descendant une rampe avec ses moteurs asynchrones reliés à la ligne pourra donc prendre une allure de régime constant ; l'énergie qu'elle engendre sera communiquée à la ligne, comme celle qui est communiquée à celle-ci par l'usine génératrice.

Les lignes de chemins de fer à traction par courants polyphasés, et qui sont, pour la plupart, à fortes rampes, emploient régulièrement ce mode de freinage.

Les locomotives de chemins de fer à crémaillère du Gornergrat (1898) et de la Jungfrau (1899) descendent avec ce procédé

---

[1] *Société internationale des Électriciens*, p. 476 et suiv. ; 1902.

des rampes de 25 0/0, sans faire usage des freins mécaniques en dehors des arrêts.

Il en est de même du chemin de fer de la Valteline, dont nous avons parlé plus haut, et dont les locomotives ont deux régimes de vitesse à la descente, suivant qu'elles emploient ou non pour cet usage le couplage en cascade.

Dans la distribution citée plus haut, M. Boucherot a mis à profit les trois fréquences pour opérer successivement trois freinages étagés.

L'entrefer des moteurs asynchrones doit être aussi faible que possible : les circuits primaire et secondaire, c'est-à-dire l'inducteur et l'induit, devraient être séparés par une réluctance négligeable. Il n'en peut être ainsi, et les entrefer varient de 4 à 5 dixièmes de millimètre pour les moteurs de faible puissance, jusqu'à 1 et 2 millimètres pour les moteurs de plusieurs centaines de kilowatts. Il en résulte pour ceux-ci une certaine difficulté de construction.

L'inducteur d'un moteur asynchrone est désigné assez communément sous le nom de *stator*, bien qu'on puisse le concevoir mobile ; l'induit est désigné sous le nom de rotor, bien qu'il puisse être fixe.

Ces désignations sont dues aux Anglais : malgré leur caractère de définition pouvant comporter des exceptions, elles sont passées dans la pratique courante.

4° Moteurs asynchrones a simple phase. — Supposons que, dans un moteur asynchrone diphasé fonctionnant normalement, on interrompe le circuit de l'une des phases de l'inducteur ou stator : l'induit ou rotor continuera à tourner si le couple résistant n'est pas trop élevé [1]. On réalise ainsi un moteur asynchrone à simple phase.

L'induit y est entraîné par la rotation d'un flux résultant du flux de l'inducteur et du flux engendré par les courants de l'induit : le flux résultant tourne au synchronisme des courants d'alimentation ou inducteurs, et sa grandeur varie légèrement dans le cours d'une demi-période.

Un tel moteur, dont l'induit aurait ses enroulements fermés en court-circuit sur eux-mêmes, ne pourrait démarrer sans secours.

---

[1] La suppression du courant dans une phase d'un moteur triphasé est opérée systématiquement dans la traction, aux croisements et aux aiguillages de la ligne aérienne, pour permettre en ces points l'emploi d'un seul fil de trolley, les rails étant utilisés comme conducteurs.

En effet, ces enroulements seraient parcourus par des courants intenses (cas du secondaire en court-circuit d'un transformateur) et tendraient à annuler le flux inducteur.

Le procédé le plus communément employé pour la mise en marche de ces moteurs consiste à disposer sur l'inducteur un enroulement auxiliaire disposé par rapport à l'enroulement principal, comme le deuxième enroulement d'un moteur diphasé. Cet enroulement doit comporter un grand nombre de spires et être relativement résistant.

Au moment du démarrage, on branche en dérivation sur les deux conducteurs du courant à simple phase :

1° L'enroulement auxiliaire ;

2° L'enroulement principal, auquel on a ajouté en série une self-induction appropriée, de telle façon que le courant dérivé qui passe dans cet enroulement ne soit pas très différent du courant qui passe dans l'enroulement auxiliaire.

Ces deux courants sont, en vertu de la composition des deux circuits qu'ils parcourent, l'un très résistant, l'autre très inductif, décalés d'un angle qui tend vers 90° ; il en résulte un flux tournant.

Si l'induit a ses enroulements fermés en court-circuit et très peu résistants, ce flux tournant ne suffit pas à le mettre en mouvement ; il faut alors employer le dispositif d'enroulements aboutissant à des bagues et à des frotteurs reliés à des résistances non inductives, suivant le procédé de M. Maurice Leblanc.

Le démarrage peut alors être effectué, mais avec un couple moteur peu élevé, en raison de la faible valeur du flux inducteur résultant des courants qui parcourent les deux circuits inducteurs, dont l'un est résistant et l'autre inductif.

La mise en marche obtenue, on supprime le courant dans la phase auxiliaire, et on met en court-circuit les enroulements induits.

On trouvera des descriptions d'autres procédés de mise en marche, comme celui de M. Heyland (phase auxiliaire constituée par un enroulement fermé sur lui-même), qui permet de démarrer en charge, de même que l'emploi de moteurs dont l'induit porte un collecteur, et est relié à l'inducteur comme dans une dynamo à courant continu en série ; une fois la mise en marche réalisée, on met en court-circuit les enroulements de l'induit, et celui-ci est entraîné par l'induction d'un champ tournant ; mais ces procédés sont moins répandus que le précédent.

On voit que ces moteurs à simple phase ne peuvent être d'un usage aussi satisfaisant que les moteurs polyphasés.

Cette infériorité a conduit à l'adoption des courants polyphasés dans les distributions d'énergie sous forme mécanique.

On doit à M. Maurice Leblanc la première démonstration de la possibilité de réaliser de tels moteurs (1), et probablement à M. C.-E. Brown leur première réalisation dans la forme actuelle (2).

La théorie analytique du fonctionnement de ces moteurs, ainsi que des moteurs à flux tournant produit par des courants polyphasés, a été établie par M. A. Potier en 1894 (3).

Cette analyse a servi de base aux recherches de même nature effectuées depuis cette époque.

5° Moteurs a collecteur en série. — Le moteur à courant continu à inducteurs en série constitue un véritable électrodynamomètre à noyau de fer ; comme le courant continu, le courant alternatif y développe un couple qui tend à déplacer les deux circuits l'un par rapport à l'autre.

On conçoit donc qu'un moteur-série puisse fonctionner alimenté par un courant alternatif.

Il y a de longues années qu'on a montré la possibilité de ce fonctionnement avec des moteurs de quelques kilogrammètres (2 ou 3) ; pour des puissances supérieures, l'expérience était moins satisfaisante et ne donnait rien qui fût pratique ; elle fut longtemps abandonnée et presque oubliée.

Un électrodynamomètre à noyau de fer serait d'un usage peu satisfaisant pour le courant continu, et inadmissible pour le courant alternatif : hystérésis, courants de Foucault et self-induction rendraient l'appareil impraticable. Dans l'emploi du moteur à collecteur en série avec le courant alternatif, à ces inconvénients vient s'ajouter le fonctionnement naturellement défectueux des balais (4).

Quoi qu'on fasse, la perte par hystérésis dans le noyau de fer ne

---

(1) *Lumière électrique*, p. 419 et suiv. ; 30 mai 1891 ; p. 371 et suiv. ; 25 février 1893.

(2) *The Electrician*, 27 janvier 1893.

(3) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, p. 248 et suiv. ; 1894 : *Sur les moteurs à induit fermé sur lui-même*.

(4) Les spires en court-circuit sous balais subissent l'induction du flux alternatif de l'inducteur, et se comportent comme des spires d'un transformateur en court-circuit pendant un temps très court, qui est celui de la commutation.

peut être éliminée. Les courants de Foucault peuvent être réduits à un minimum admissible par l'emploi d'un circuit magnétique en feuilles de tôle mince (de 3 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur).

La self-induction pourrait être amoindrie et combattue de différentes façons, dans le circuit inducteur et dans le circuit induit ; les procédés théoriques ne manquent pas : ils se restreignent à l'usage.

Vers 1893, Dery et Blathy contruisirent des moteurs en série à inducteurs feuilletés [1], dont les intervalles polaires étaient munis de circuits amortisseurs du genre de ceux que M. Maurice Leblanc avait préconisés un peu avant (1892), et qui avaient pour but d'améliorer le fonctionnement des balais [2].

Ces moteurs, démarrant en charge et s'adaptant aux fréquences usuelles de 40 à 50, ont rendu des services, pendant une dizaine d'années, dans certains cas, comme celui des ascenseurs, bien que le facteur de puissance et le fonctionnement des balais y fussent en général peu satisfaisants ; le poids et le prix de ces moteurs étaient élevés.

L'étude de la traction par courant alternatif à simple phase (emploi de transformateurs statiques sans surveillance échelonnés le long de la ligne pour la distribution à basse tension ; emploi d'un seul fil de trolley), entreprise de différents côtés dans ces dernières années, a ramené de nouveau l'attention sur le moteur série à collecteur, démarrant sous charge et pouvant fonctionner à une allure variable [Finzi [3], Lamme-Westinghouse].

Pour améliorer le facteur de puissance, le fonctionnement des balais et diminuer le poids, on a eu recours, dans la traction, à des fréquences peu élevées (de 15 à 18 au lieu de 40 à 50 dans les réseaux de distributions ordinaires).

On a pu obtenir ainsi des facteurs de puissance de 0,80 environ avec un fonctionnement de balais comparable à celui des moteurs à courant continu.

La mise en marche des moteurs en série à courant alternatif peut être effectuée pour l'intercalation dans le circuit d'une self-induction à spires variables (ou autotransformateur), qui permet de réduire au minimum l'effet Joule au démarrage (suppression du rhéostat). Il en résulte une économie d'énergie d'autant plus appréciable par rapport

(1) *Lumière électrique*, vol. XLIX, p. 151 ; 1893.
(2) Les balais en charbon venaient de faire à point leur apparition.
(3) *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, p. 299 et 436 ; 1903.

à l'emploi du courant continu que les démarrages sont plus fréquents.

Enfin, si le fonctionnement des balais a été rendu pratique, c'est que, à part la réduction de la fréquence, on a fait usage, pour l'améliorer, de divers procédés, la plupart déjà proposés pour les dynamos à courant continu [grand nombre de lames au collecteur, résistance électrique élevée des connexions des sections de l'induit, enroulements compensateurs du genre Ryan [1], etc.]

On a, sans trop de complications, réalisé des moteurs série fonctionnant alternativement avec du courant continu et avec du courant alternatif : M. Steinmetz a exécuté des moteurs de tramways qui, dans la ville de Schenectady, fonctionnent avec du courant continu, et, en dehors, avec du courant alternatif.

6° Moteurs a répulsion. — A l'Exposition de 1889, un moteur de M. Elihu Thomson, muni d'un collecteur et de balais, fonctionnait avec du courant alternatif simple [2] ; son aspect était celui d'une dynamo bipolaire à courant continu.

L'inducteur seul était excité par le courant alternatif ; l'induit, muni d'un enroulement ordinaire pour courant continu, avait ses balais réunis en court-circuit par un conducteur. La position de ces balais sur le collecteur ne correspondait ni à la ligne neutre interpolaire, ni à la ligne des pôles à 90° de la première, mais à une position presque rigoureusement intermédiaire entre les deux précédentes. Le sens du mouvement de l'induit était tel que les contacts des balais se trouvaient en arrière de la ligne neutre. Au démarrage, le couple était important, la vitesse variait avec la charge, et le fonctionnement des balais n'était pas sans étincelles.

A une certaine vitesse, M. Elihu Thomson mettait en court-circuit toutes les sections de l'induit ; celui-ci continuait à tourner, et les balais pouvaient être relevés.

Ce spécimen de moteur, malgré ses propriétés intéressantes, mais peu comprises à cette époque, ne parut pas au point pour la pratique et n'y entra pas.

Depuis peu, la recherche du moteur à courant alternatif simple

---

(1) Enroulement fixe bobiné sur les pièces polaires autour de l'induit et comportant le même nombre d'ampères-tours que celui-ci. Voir Ficher-Hinnen, p. 203; 1897, Zurich.

(2) Silvanus et P. Thompson, *Courants polyphasés*, traduction Boistel, édition 1896, p. 195.

tend à faire revivre sous des formes mieux étudiées le moteur dit *à répulsion* d'Elihu Thomson.

Reprenons le type bipolaire de 1889. L'inducteur, seul excité par le courant de la ligne, constitue, en réalité, le circuit primaire d'un transformateur dont le secondaire est l'enroulement de l'induit.

Si on cale les balais suivant la ligne neutre, à 90° de la ligne des pôles, aucun courant ne se développera dans l'induit, les balais réunissant, par leur court-circuit, des points au même potentiel.

Si on cale les balais suivant la ligne des pôles, un courant intense traversera le court-circuit, alimenté par les deux moitiés de l'induit qui se comporteront comme deux éléments secondaires d'un transformateur mis en parallèle par un conducteur court et de forte section.

Dans le premier cas (calage sur la ligne neutre et courant nul), aucun couple ne tendra à déplacer l'induit; il en sera de même dans le second cas (calage sur la ligne des pôles), en raison de la production de courants intenses dans les deux parties symétriques de l'induit par rapport à la ligne des pôles.

Si on fait varier le calage des balais entre les deux positions extrêmes, en partant de l'une d'elles, un couple prend naissance qui croît jusqu'à un maximum pour décroître ensuite jusqu'à s'annuler.

Le calage pratique sera donc celui qui correspond au couple maximum.

Dans cette position, une composante importante des courants de l'induit se trouve en phase avec le flux de l'inducteur.

A la vitesse du synchronisme, la commutation est théoriquement parfaite. Au-dessus et au-dessous du synchronisme, les sections en court-circuit sous les balais subissent une induction dont nous avons déjà parlé à propos du moteur série à courant alternatif.

La vitesse varie avec la charge et s'accélère quand celle-ci diminue.

L'aspect d'un moteur à répulsion est généralement, aujourd'hui, celui d'un moteur polyphasé dont l'induit porterait un enroulement à collecteur.

L'inducteur ou stator n'a pas de pôles saillants ; l'enroulement y est réparti sur toute la circonférence. Les conducteurs du stator parallèles aux conducteurs de l'induit ou rotor, dont ils ne sont éloignés que de la valeur de l'entrefer, tendent à annuler — ou *compenser* — la réaction de l'induit, comme l'enroulement compensateur Ryan,

dans une dynamo à courant continu. L'entrefer est celui d'un moteur polyphasé.

On conçoit que l'induit d'un moteur à répulsion ainsi construit puisse comporter une mise en court-circuit de ses sections à une vitesse voisine du synchronisme, et fonctionner alors en moteur asynchrone (moteurs Wagner, *Exposition de Saint-Louis*, 1904).

Il est remarquable que M. E. Thomson ait réalisé ce fonctionnement (sections en court-circuit, marche asynchrone) avec son moteur imparfait de 1889.

Les moteurs à répulsion actuels ont à peine pris rang dans l'industrie; mais, comme ils développent aux démarrages des couples comparables aux couples que développent les moteurs en série, comme leur facteur de puissance, à l'allure normale, peut atteindre une valeur élevée, et qu'ils ont, de plus, l'avantage de fonctionner aux fréquences usuelles (40 à 50), leur étude s'impose au moins au même titre que l'étude du moteur série et que celle du moteur compensé.

7° Moteur compensé. — Prenons le moteur à répulsion du dernier style; établissons l'enroulement de l'induit ou rotor de façon qu'il puisse supporter sans inconvénient le courant qui passera dans l'inducteur ou stator; disposons sur le collecteur, aux extrémités du diamètre neutre interpolaire, deux lignes de balais reliées respectivement au stator et à la ligne comme dans un moteur en série, puis deux autres lignes de balais aux extrémités du diamètre correspondant à l'axe des pôles, ces deux dernières lignes de balais étant réunies par un court-circuit, comme dans le moteur à répulsion.

On aura ainsi la structure générale du moteur dit *compensé*, tel que l'a présenté M. M. Latour [1].

Si on lance un courant alternatif simple dans les deux circuits en série (stator et rotor), le démarrage s'effectuera comme dans un moteur en série. Le fonctionnement des balais reliés au circuit du stator et à la ligne ne donnera lieu à aucune étincelle [2]; il n'en sera pas de même des balais réunis en court-circuit, qui cracheront légé-

---

[1] *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, p. 299 et suiv.; 1903 : *Nouveau matériel à courant alternatif simple*, par M. M. Latour; — *l'Industrie électrique*, p. 269; 1905 : *Traction électrique par moteurs Latour*.

[2] Ce qui n'est pas au démarrage d'un moteur série ordinaire à courant alternatif simple.

rement jusqu'à ce que la vitesse ait acquis une certaine valeur. Au synchronisme, tout crachement disparaît et les différentes lignes de balais ont un égal aspect.

A ce moment le rotor se comporte comme un véritable inducteur; car il donne lieu à un flux tournant et on ne constate entre les lignes de balais qu'une chute ohmique due à la résistance des spires, sans aucune force électromotrice. La réaction du flux tournant sur les spires du stator produit le couple moteur. A la vitesse du synchronisme et pour cette seule valeur, le facteur de puissance est égal à l'unité.

La théorie du fonctionnement de ce moteur est complexe : elle n'est pas complètement établie, mais on peut concevoir assez simplement le résultat de la composition des courants, la composition des flux et de la *compensation* qui réagit sur le fonctionnement des balais. La vitesse du moteur compensé, enroulé en série, varie avec la charge, et s'accélère quand celle-ci diminue; M. M. Latour a indiqué qu'on pouvait réaliser des moteurs compensés à inducteur ou stator en dérivation et dont la vitesse varie aussi peu avec la charge sous tension constante que celle d'un moteur en dérivation à courant continu dans le même cas.

Plusieurs moteurs compensés Latour ont été construits depuis deux ans [moteurs d'appareils de levage et de traction (1)]. Leur développement est actuellement comparable à celui des moteurs série et des moteurs à répulsion.

MM. Winter et Eichberg ont construit des moteurs qui ne diffèrent du précédent que par un détail de réglage, et ont ainsi équipé les deux lignes de traction à courant alternatif simple de Niederschonweide (Allemagne) et de la vallée de la Stubaï (Fulpnels-Innsprück) (2) fonctionnant depuis l'année dernière.

POIDS D'UN MOTEUR DE 100 KILOWATTS.

Comme exemple, nous donnerons le poids d'un moteur de type courant, c'est-à-dire commercial, tel qu'il figure dans les catalogues des constructeurs, pour chacun des types décrits ci-dessus, sauf les

(1) Essai de traction à Paris-Malakoff. — Traction de la ligne du Borinage.

(2) *Industrie électrique*, p. 133; 1905 : *Chemin de fer à courant alternatif simple de la vallée de la Stubaï.*

trois derniers (moteurs à collecteurs à courant alternatif simple) dont la pratique n'est pas encore suffisamment répandue.

Il s'agit d'un moteur pouvant recevoir indéfiniment, sans arrêt, 100 kilowatts à ses bornes, et rendre 0,90 à 0,92 de cette puissance sur son arbre :

Moteur synchrone à simple phase.....	4.600	kilogrammes
— asynchrone à simple phase....	4.350	—
— synchrone polyphasé.....	3.900	—
— à courant continu.....	3.300	—
— asynchrone polyphasé.....	3.100	—

Ces poids ne sont qu'approximatifs et peuvent comporter quelques variations, en particulier si on adapte un même type à des tensions différentes (foisonnement de l'isolement des conducteurs agissant sur les dimensions générales, variation de la longueur et du nombre des lames du collecteur).

Si on veut alléger exceptionnellement un moteur de 100 kilowatts en réduisant au minimum tout ce qui est en dehors du circuit magnétique et des conducteurs, on peut obtenir des poids moindres que les précédents, mais la construction devient relativement coûteuse par suite de l'accroissement de la main-d'œuvre (exagération des surfaces travaillées) ; il en est de même si on pousse l'allure au delà de la limite de sécurité qu'il est prudent de ne pas franchir en service ininterrompu.

Ce dernier cas est celui des moteurs de traction et des moteurs destinés aux appareils de levage, dont le fonctionnement est, par essence, intermittent.

Les moteurs de traction méritent une mention spéciale.

Ils sont, en général, complètement enfermés (cuirassés, blindés) ; leur refroidissement est difficile. De plus, en raison du faible espace qui leur est réservé sous le châssis du véhicule, entre les roues, leurs dimensions sont relativement restreintes, et, d'autre part, leur poids doit être aussi faible que possible ; il en résulte que ces moteurs sont naturellement *poussés*. Ainsi, par exemple, un moteur de traction à courant continu destiné à recevoir au maximum 100 kilowatts à ses bornes ne pèsera que 2.500 kilogrammes. Mais il sera entendu que cette puissance de 100 kilowatts ne sera pas absorbée sans interruption. Étant donnée l'absence de ventilation de ces moteurs enfermés, les cahiers des charges n'exigent qu'une épreuve de trois quarts

d'heure à une heure à la puissance maxima. La puissance qu'ils pourraient supporter indéfiniment, sans ventilation artificielle [1], est inférieure à la moitié de la puissance maxima, en admettant que les inducteurs sont en série et subissent à faible charge la même diminution de courant que l'induit.

EMPLOI DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

Comme on vient de le voir, les moteurs électriques sont légers : il s'ensuit que leur prix d'achat est peu élevé. Leur entretien est facile. Leur rendement moyen laisse loin derrière lui les rendements des récepteurs à vapeur, à air comprimé et même à eau sous pression [2] ; les canalisations électriques, d'un établissement facile, ne prélèvent qu'un faible pourcentage de l'énergie qu'elles transportent.

Les distributions d'énergie électrique présentent une somme d'avantages que ne possède aucun des autres modes de distribution de l'énergie mécanique, et on comprendra que ces derniers ne soient plus appliqués que dans un petit nombre de cas particuliers.

Les transmissions d'une usine, telles qu'on les décrit classiquement, comportent des arbres de couche, des poulies et des courroies pour relier la machine motrice aux machines opératoires. Celles-ci sont mises en action ou arrêtées au moyen de débrayages, les arbres de couche tournant toujours à une vitesse sensiblement constante.

Le coefficient d'activité d'une machine opératoire est le rapport du temps pendant lequel cette machine est en action, c'est-à-dire travaille utilement, au temps total pendant lequel tournent les arbres de transmission de l'usine. Ainsi, par exemple, si ces arbres tournent 12 heures par jour, et si, par jour, une machine opératoire n'est employée utilement que pendant 6 heures, son coefficient d'activité est $\frac{1}{2}$.

Plus ce coefficient d'activité est élevé, meilleure est l'utilisation de la transmission.

---

(1) Celle-ci sera indispensable lorsque les trains à traction électrique effectueront des parcours de plus de trois quarts d'heure à une heure sans arrêt et en pleine charge.

(2) Les moteurs pour eau sous pression à cylindre et piston exigent toujours le même travail, estimé en amont de la valve d'admission, par cylindrée, quel que soit le travail résistant correspondant. D'où un rendement décroissant à mesure que la charge diminue.

Cette utilisation se manifeste dans la dépense de combustible : le rendement réel des transmissions de l'usine devra donc être établi en tenant compte des termes suivants :

1° Perte de puissance par les transmissions quand les machines opératoires sont en action ;

Cette perte de puissance détermine le *rendement mécanique* ρ des transmissions ;

2° Perte de puissance par les transmissions en mouvement, les machines opératoires n'étant pas en action ;

3° Coefficient d'activité $\frac{1}{k}$ du temps total pendant lequel tournent les transmissions ; ce temps total (journée de travail, par exemple) peut être pris pour unité.

En conséquence, les transmissions donnent lieu à un rendement ρ pendant un temps $\frac{1}{k}$, et pendant le reste du temps, qui a pour valeur $1 - \frac{1}{k}$, elles débitent une puissance sans effet utile. Le rendement réel des transmissions, évalué pour toute la durée de l'unité de temps, peut être donné assez approximativement par la formule

$$\rho \frac{1}{1 + (k - 1)(1 - \rho)}$$

que nous avons établie il y a quelques années [1].

Cette formule permet de comparer les mérites respectifs d'une transmission purement mécanique et d'une distribution électrique.

Pendant le temps $1 - \frac{1}{k}$, cette dernière ne donne lieu à aucune perte de puissance, le courant étant interrompu. Cette propriété est particulièrement favorable à l'emploi des moteurs électriques. Il en est de même quand la longueur des transmissions mécaniques augmente.

Pour compléter, dans un avant-projet, la comparaison d'une transmission mécanique et d'une distribution électrique, il y a lieu d'évaluer en outre les dépenses totales de premier établissement dans les deux cas. Malgré la hausse récente du cuivre, dont le prix s'est

---

[1] *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale : les Transmissions électriques dans les ateliers*, par A. Hillairet, décembre 1895.

accru de 50 0/0 au cours de cette année, le prix des moteurs et des canalisations est tel qu'on rencontrerait difficilement aujourd'hui un établissement industriel sans distribution électrique.

Les instruments de mesure les plus simples, ampèremètres, voltmètres, wattmètres à lecture directe, compteurs d'énergie et enregistreurs, permettent de déterminer la puissance à chaque instant aux bornes d'un générateur de courant, d'une distribution ou d'un moteur. Cette détermination est plus simple et plus exacte s'il s'agit de courant continu que pour toute autre forme de courant.

Si un moteur a été préalablement taré, c'est-à-dire si on en a vérifié le rendement dans des conditions de fonctionnement très diverses, on peut s'en servir comme d'un véritable dynamomètre de transmission.

Ce dernier appareil, réalisé sous les formes les plus variées, et le plus souvent sans succès[1], au cours du siècle dernier, est demeuré comme une curiosité sans caractère industriel; en quelques années, les moteurs électriques nous ont apporté les renseignements dynamométriques les plus complets et les plus exacts qu'on puisse demander industriellement.

Nous pouvons relever actuellement, dans ses moindres variations, le régime de la puissance absorbée par les machines opératoires : l'avant-projet d'une usine ne comporte plus, sous ce rapport, ni évaluation fantaisiste, ni aléa.

L'usine en marche, les opérations peuvent être suivies et réglées avec une exactitude inconnue jusqu'à l'apparition des moteurs électriques.

L'atelier, l'usine, le chantier, la mine, le navire qui possèdent des machines motrices peuvent y atteler des machines génératrices de courant électrique et en distribuer l'énergie à leurs différents services.

Les machines motrices thermiques sont d'un établissement coûteux ; leur surveillance exige un personnel expérimenté et attentif et leur consommation relative s'accroît quand leur importance diminue. Si leur activité ne s'étend que sur une faible fraction de l'année, leur usage devient impossible dans certains cas, comme par exemple dans les exploitations agricoles de moyenne importance.

---

[1] La construction de dynamomètres à vitesse de rotation élevée présente des difficultés particulières d'étude et d'exécution.

Les puissantes distributions électriques qui commencent à se répandre pour alimenter des étendues de territoires correspondant à un ou plusieurs départements vont modifier profondément cette situation.

Il arrivera une époque, probablement assez rapprochée, où la surface entière de notre pays, comme d'ailleurs la surface de toute l'Europe et de bien d'autres régions, sera desservie par des réseaux de distribution d'énergie plus serrés que les réseaux télégraphiques et téléphoniques.

Peu à peu les plus grands établissements industriels, comme les plus modestes, trouveront avantage à se relier à ces distributions qui pourront, grâce à leur importance, débiter l'énergie électrique à bon compte, de quelque façon qu'elle soit obtenue, par le moyen de machines hydrauliques ou par le moyen de machines thermiques (1).

---

(1) Nous ne croyons pas au développement futur, si prôné par quelques économistes, des *ateliers de famille* comme conséquence du développement des distributions électriques. Au point de vue de la production industrielle, les ateliers de famille seront toujours dans une situation inférieure aux usines. Au point de vue hygiénique, leur multiplicité ne nous paraît pas désirable. On consultera avec intérêt, sur ce sujet, le rapport présenté, en 1902, à M. le Ministre de l'Industrie et du Travail du royaume de Belgique, par MM. Dubois et Julin (Bruxelles, 1902), et en particulier les pages 37, 93, 137, 181, 257, 259, 277, 279 dudit rapport. — Voir aussi : *la Transformation du travail par le moteur électrique*, par M. Marc Mangini, imprimerie du *Stéphanois*, Saint-Etienne, 1904.

ÉTAT ACTUEL DE L'INDUSTRIE DES ACCUMULATEURS (1)

Par M. Jumau,
Ingénieur électricien.

Pour justifier le titre si général donné à cette conférence, je devrais non seulement vous exposer l'état actuel de nos connaissances sur l'accumulateur au point de vue théorique et au point de vue technique, mais encore décrire les différents types d'accumulateurs actuellement employés et enfin examiner les différentes applications auxquelles donnent lieu ces appareils.

Dans l'impossibilité de réaliser en si peu de temps un tel programme, je devrai me borner et j'ai pensé que la meilleure manière de mettre au point l'accumulateur dans son état actuel, c'est encore de l'étudier au point de vue tout à fait général de son fonctionnement. Ses qualités ressortent évidemment beaucoup mieux d'une telle étude que de la description que l'on peut faire des différents types actuellement construits.

Nous commencerons cette étude par l'accumulateur au plomb, qui est encore presque exclusivement le seul employé. Les conditions de fonctionnement de cet élément étant connues, nous passerons rapidement en revue les différents couples qui ont été proposés pour le remplacer, ce qu'aucun n'a encore réussi à faire, et enfin nous terminerons par quelques considérations générales relatives à la possibilité d'obtenir un accumulateur supérieur à l'accumulateur actuel afin de répondre aux exigences toujours croissantes de l'industrie électrique.

Avant d'entrer dans le domaine purement technique, nous dirons quelques mots de la théorie de l'accumulateur au plomb, ces dernières années ayant vu paraître un certain nombre de travaux sur la question.

Nous étudierons ensuite les différents facteurs de fonctionnement de l'accumulateur.

Rappelons ici qu'on appelle accumulateur électrique une pile qui possède la propriété d'être réversible, c'est-à-dire de pouvoir, après son épuisement, être régénérée dans son état initial par le simple passage d'un courant de sens inverse au courant de décharge. Cette

(1) Conférence faite le 23 mai 1905.

condition exige évidemment que les réactions chimiques soient les mêmes, mais de sens inverse pendant les deux opérations : décharge et charge. La dénomination d'accumulateur est imparfaite, puisqu'elle ne rend pas compte de la fonction de double transformation de cet appareil : transformation d'énergie chimique en énergie électrique pendant la décharge et d'énergie électrique en énergie chimique pendant la charge. La dénomination de pile ou couple réversible est certainement beaucoup plus correcte.

L'accumulateur au plomb, que nous allons tout d'abord étudier, est, comme on le sait, le couple réversible plomb, acide sulfurique, peroxyde de plomb.

Théorie de l'accumulateur au plomb. — Nous n'entrerons pas ici dans la discussion des différentes théories, que nous avons faite d'autre part [1].

Nous dirons seulement qu'au point de vue chimique les travaux les plus minutieux faits pendant ces dernières années viennent confirmer la double sulfatation d'après l'équation réversible :

$$Pb + 2H^2SO^4 + PbO^2 \rightleftarrows PbSO^4 + 2H^2O + PbSO^4.$$

Au point de vue thermodynamique, toute théorie doit être en accord avec l'équation d'Helmholtz :

$$E = \frac{W}{23091a} + T\frac{dE}{dT},$$

E étant la force électromotrice, W la quantité de chaleur (en calories g-d) dégagée, a la valence et $\frac{dE}{dT}$ le coefficient de température. Or la théorie de la double sulfatation donne un accord suffisant, étant donné le peu de précision des mesures thermochimiques. C'est ce que prouvent les nombreux essais entrepris depuis quelques années et dans lesquels on a comparé E mesuré directement à E calculé d'après les mesures de W et de $\frac{dE}{dT}$. L'affirmation que le plomb spongieux doit être dans un état allotropique du plomb tel que le dégagement de chaleur est beaucoup plus élevé que celui donné par le plomb ordinaire tombe devant l'expérience directe qui montre que le plomb ordinaire, à condition de n'être pas encore recouvert de sa

---

[1] L. Jumau, *Les Accumulateurs électriques*. H. Dunod et E. Pinat, éditeurs.

couche de sulfate, donne exactement la même force électromotrice que le plomb spongieux.

Un des faits théoriques les plus saillants de ces dernières années est certainement l'application de la théorie des ions à l'accumulateur au plomb. C'est à la théorie des ions que l'on doit l'explication satisfaisante du processus de charge et de décharge d'après la double sulfatation. Si l'on admet avec Le Blanc que le peroxyde de plomb possède une certaine solubilité dans l'eau, on a les réactions suivantes à la décharge :

$$(1) \qquad PbO^2 + 2H^2O = \overset{++++}{Pb} + 4\overset{-}{O}H$$

$$(2) \qquad \overset{++++}{Pb} + Pb + 2\overset{--}{SO^4} = 2PbSO^4$$

$$(3) \qquad 4\overset{-}{O}H + 4\overset{+}{H} = 4H^2O.$$

Le peroxyde en solution se dissocie en ions $\overset{++++}{Pb}$ tétravalents (1). Ces ions cèdent deux charges positives à la cathode, par le circuit extérieur, de sorte que celle-ci envoie à son tour des ions $\overset{++}{Pb}$ en solution qui s'unissent, comme les premiers redevenus bivalents, aux ions $\overset{--}{SO^4}$ (2). A la charge, on a les équations :

$$(4) \qquad 2PbSO^4 \text{ solide} = 2\overset{++}{Pb} + 2\overset{--}{SO^4}$$

$$(5) \qquad 2\overset{++}{Pb} = \overset{++++}{Pb} + Pb$$

$$(6) \qquad \overset{++++}{Pb} + 4\overset{-}{O}H = PbO^2 + 2H^2O$$

$$(7) \qquad 4\overset{+}{H} + 2\overset{--}{SO^4} = 2H^2SO^4.$$

Le sulfate de plomb envoie en solution des ions Pb bivalents aux deux pôles (4). Puis les ions bivalents de la positive prennent deux charges positives et passent à l'état d'ions tétravalents, tandis que les ions bivalents à la négative abandonnent leurs deux charges et se précipitent à l'état métallique (5). De même, à la positive, le peroxyde de plomb se reprécipite dès que la concentration des ions de plomb tétravalents atteint celle qui correspond à la limite de solubilité du peroxyde (6).

D'après Liebenow, on pourrait considérer la positive comme réversible par rapport aux ions $\overset{--}{PbO^2}$, de même que la négative est réversible par rapport aux ions $\overset{++}{Pb}$. A la décharge, la négative se comporte comme dans l'hypothèse précédente, pendant que les ions $\overset{--}{PbO^2}$ de la positive réagissent sur les ions $\overset{+}{H}$ d'après les équations :

$$\overset{--}{PbO^2} + 4\overset{+}{H} = \overset{++}{Pb} + 2H^2O$$

et

$$\overset{++}{Pb} + \overset{--}{SO^4} = PbSO^4.$$

A la charge, les phénomènes inverses ont lieu, le sulfate de plomb se dissociant de la façon suivante :

$$2PbSO^4 + 2H^2O = \overset{++}{Pb} + 4\overset{+}{H} + Pb\overset{--}{O^2} + 2\overset{--}{SO^4},$$

et les ions $\overset{++}{Pb}$ et $Pb\overset{--}{O^2}$ cédant simplement leurs charges pour redonner le plomb spongieux et le peroxyde de plomb.

Force électromotrice de l'accumulateur au plomb. — Au point de vue de la mesure de la force électromotrice comme de la tension, l'introduction, qui remonte à quelques années seulement, de l'emploi d'électrodes auxiliaires, a permis l'étude séparée de l'anode et de la cathode et a contribué puissamment à accroître nos connaissances sur le fonctionnement de l'accumulateur. On mesure la différence de potentiel entre l'électrode auxiliaire et l'anode, d'une part, et la cathode, d'autre part, et on peut suivre ainsi les variations de force électromotrice ou de tension anodique et cathodique, la force électromotrice, ou la tension aux bornes de l'élément, étant évidemment la différence algébrique des deux valeurs ainsi mesurées. Bien des remarques sont à faire à propos des électrodes auxiliaires, qui doivent réunir un certain nombre de qualités. En outre, dans la discussion des résultats, on doit tenir compte du choix de l'électrode employée et des réactions des couples anode ou cathode, électrode auxiliaire, pendant les mesures. On trouvera des développements complets sur cette question dans le traité précédemment cité.

La force électromotrice de l'accumulateur varie dans d'assez grandes limites avec la concentration de l'acide, ainsi que la théorie permet de le prévoir et ainsi qu'on le constate par expérience. Pour donner une idée de cette variation, voici quelques valeurs observées : 1,89 volt pour $d = 1,044$ (59°, B.) ; 1,96 volt pour $d = 1,116$ (15° B.) ; 2,04 volts pour $d = 1,21$ (25° B.), et 2,23 volts pour $d = 1,383$ (40° B.). Si, en pratique, on ne tire pas profit de cette augmentation, c'est parce que, comme nous le verrons, le fonctionnement de l'élément devient très défectueux avec des électrolytes trop concentrés.

Beaucoup plus faible et négligeable en pratique est la variation de la force électromotrice avec la température. Les mesures de Dolezalek montrent que le coefficient de température est positif pour les densités d'acide supérieures à 1,044 (avec un maximum de 0,38 millivolt par

degré pour $d = 1,125$) et négatif pour les densités d'acide inférieures.

La théorie thermodynamique et la théorie osmotique ont permis de calculer les variations soit de la force électromotrice, soit du potentiel anodique ou cathodique en fonction de la concentration, et ici aussi la double sulfatation s'est trouvée en accord satisfaisant avec l'expérience.

La force électromotrice varie pendant les différents états de charge et de décharge. Cette variation ne provient pas de la modification chimique de la matière, car on a reconnu que la force électromotrice varie très peu avec les proportions croissantes de sulfate de plomb à la positive comme à la négative. Elle doit être imputée surtout aux variations de concentration de l'acide dans les pores de la matière active, concentration plus élevée en charge, plus faible en décharge.

Résistance intérieure de l'accumulateur au plomb. — Nous passerons sous silence les méthodes de mesures récentes, imaginées en assez grand nombre.

La résistance diminue-t-elle lorsque l'intensité croît ? C'est ce qu'on admettait assez généralement autrefois ; cependant des essais récents, à l'aide d'une méthode de mesure directe de résistance de l'élément à circuit fermé, n'indiquent aucune dépendance de l'intensité. Il est possible pourtant qu'une telle méthode ne soit pas sans objection dans ce cas.

La résistance intérieure varie pendant les différents états de charge et de décharge. Elle augmente pendant la décharge, plus rapidement vers la fin ; elle peut ainsi doubler et même tripler ou quadrupler. En charge, elle repasse à peu près par les mêmes valeurs en sens inverse.

Des mesures de Dolezalek et Gahl, il résulte que, à la fin de la charge, la plus grande partie de la résistance intérieure est donnée par l'électrolyte. La résistivité de celui-ci passe par un minimum (1,365 ohm-cm à 18° C. pour la concentration 30 0/0 de H^2SO^4). Pendant la décharge, l'augmentation est due surtout aux électrodes (formation de sulfate, dilution de l'acide dans les pores).

En général, on trouve que la plus grande variation de résistance provient de la positive. Cependant la négative, lorsqu'elle est poussée, donne une augmentation de résistance plus rapide vers la fin.

La résistance varie également avec la température, qui diminue, comme on sait, la résistivité de l'acide sulfurique d'après un coefficient

compris entre 1,45 et 1,70 0/0 par degré pour les densités ordinaires de 1,14 à 1,26.

Différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur au plomb. — Connaissant la force électromotrice d'un élément et sa résistance intérieure, on obtient directement la différence de potentiel aux bornes e d'après $e = E \pm rI$, selon que l'élément charge ou décharge. Cependant la difficulté de mesurer la résistance intérieure et la force électromotrice, si instables et si variables, fait qu'en pratique on ne se sert pour ainsi dire jamais des composantes E et r pour la détermination de e que l'on mesure directement. Même dans les cas où les éléments doivent servir dans les batteries-tampon et où une des qualités les plus importantes à distinguer est la faiblesse de la résistance intérieure, la valeur de celle-ci n'est presque jamais donnée, et les qualités de l'élément résultent d'une courbe caractéristique (variation de e en fonction de I) que nous examinerons dans ce chapitre.

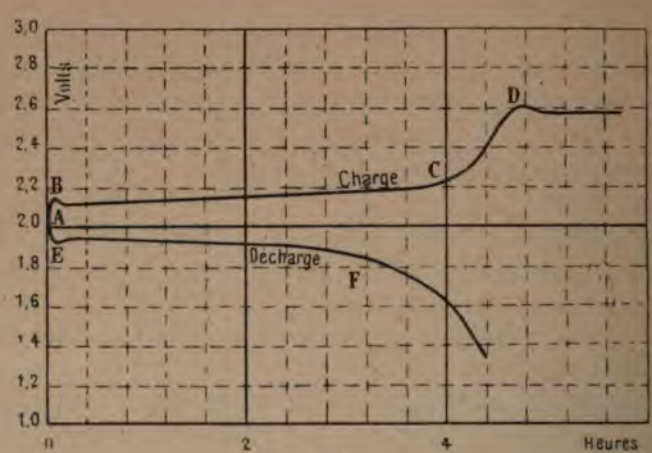

Fig. 1.

La variation de e pendant les différents états de charge et de décharge est donnée par les courbes bien connues de la *fig.* 1. Si je projette ces courbes, c'est pour tenter d'expliquer certaines particularités peu connues. Sur la courbe de décharge, on voit d'abord une baisse rapide AE, qui provient surtout de ce que la formation de sulfate a produit une diminution de concentration de l'acide dans le voisinage immédiat de la matière active. Souvent la courbe passe

par un minimum E, se relève légèrement, puis baisse lentement jusqu'en F par suite de la diminution de force électromotrice et de l'augmentation de la résistance intérieure, dues surtout à la diminution progressive de concentration dans les pores et à la formation du sulfate de plomb. En F se produit le crochet, lorsque la diffusion est incapable d'amener à l'intérieur l'acide nécessaire (les pores se bouchent de plus en plus par suite de la présence du sulfate qui augmente le volume de la matière, et la matière travaille de plus en plus en profondeur). Il survient à la fois une baisse de la force électromotrice et une augmentation de la résistance.

Le minimum E peut être expliqué de différentes façons. D'après Dolezalek, on doit l'attribuer à la formation d'une solution sursaturée de sulfate de plomb. Comme la solubilité du sulfate de plomb diminue avec la dilution, Dolezalek admet que la diminution initiale de concentration provoque une sursaturation du sulfate et, par suite, une augmentation de concentration [1] des ions $\overset{++}{Pb}$, ce qui, d'après l'équation de Liebenow :

$$E = \frac{RT}{2} \log_{nép} \frac{C_p \cdot C_0}{[\overset{++}{Pb}]\,[\overset{--}{PbO^2}]},$$

donne lieu à une diminution de force électromotrice.

Parmi les autres explications, citons l'augmentation de température dans les pores, par suite de l'effet Joule et aussi de la chaleur de dilution de l'acide ; cette petite élévation de température provoquant une diminution de résistance intérieure. On a admis aussi (U. Schoop) que l'hydrogène occlus dans la négative créait une diminution initiale de la surface et une formation d'eau, cause de baisse de la force électromotrice. Il faut remarquer cependant que le minimum en question se constate également sur la force électromotrice et aussi sur la tension anodique comme sur la tension cathodique ; il dépend de nombreuses circonstances : intensité de la charge précédente, intervalle entre la charge et la décharge, densité et température de l'acide, intensité du courant de décharge, épaisseur de la matière active. L'explication de Dolezalek est la plus plausible.

En charge, l'augmentation initiale provient de la mise en liberté de H^2SO^4 par suite de la décomposition du sulfate. En B se produit

---

[1] La concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ est désignée dans la formule par l'expression $[\overset{++}{Pb}]$.

744303 A

quelquefois un maximum lorsque la quantité de sulfate formé en décharge a été suffisante pour donner lieu à une valeur élevée de la résistance initiale au début de la charge. La lente montée BC provient de l'augmentation de densité de l'acide dans les pores, d'une pénétration plus profonde des lignes de courant dans la matière et d'une plus grande difficulté d'égalisation entre l'acide intérieur et extérieur. L'augmentation rapide CD peut être expliquée avec Nernst et Dolezalek par une rapide électrolyse du sulfate de plomb dont l'acide s'est saturé pendant la charge. La concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$ diminue alors, ce qui provoque, d'après l'équation de Liebenow, une augmentation de la force électromotrice. Enfin, en D, il n'y a plus suffisamment d'ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$, et ce sont les ions $\overset{+}{H}$ et $\overset{--}{SO^4}$ de l'acide que l'on décharge. Quelquefois, après D, on trouve une légère baisse due à l'effet mécanique du dégagement gazeux qui tend à égaliser les concentrations intérieure et extérieure.

La partie finale de la charge demande encore d'autres explications. En comparant en effet les tensions cathodiques et anodiques mesurées par Nernst, de même qu'en examinant les courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acide sulfurique, on trouve que, pour séparer SO^4H^2 en ions $\overset{--}{SO^4}$ et $\overset{+}{H}$, il faut $1,9 + 0 = 1,9$ volt. Or la tension cathodique du plomb (par rapport à H) est de $+ 0,17$ volt, c'est-à-dire qu'il faut $1,90 + 0,17 = 2,07$ volts pour séparer SO^4Pb en ses ions $\overset{--}{SO^4}$ et $\overset{++}{Pb}$. Il devrait donc être impossible de séparer le plomb à la cathode (et encore moins le zinc dans l'accumulateur au zinc). Nernst a expliqué cette anomalie par ce fait que le travail nécessaire pour la formation des bulles d'hydrogène à la surface d'un métal augmente d'autant plus que le métal considéré a une faible capacité d'occlusion, ce qui est le cas du plomb. En somme, la production d'hydrogène à la surface d'un métal exige une surélévation de tension variable avec chaque métal.

Dans les *fig.* 2 et 3, nous avons relevé les variations de tension anodique et cathodique avec électrode auxiliaire en plomb, pour des concentrations variables d'acide. Comme on le voit, la capacité était limitée par les positives. Montée entre positives à la plus grande capacité, la négative 5 a donné la courbe pointillée qui montre le crochet. On remarque que les courbes dues aux positives diffèrent beaucoup plus que celles dues aux négatives, parce que, dans le premier cas, on mesure le couple Pb/PbO^2, qui varie avec la concentra-

tion, alors que, dans le second cas, on mesure le couple Pb/Pb, qui en est indépendant. Les différences entre les courbes négatives ne proviennent donc que des différences dans les concentrations des pores et des variations de résistance intérieure. Les courbes de la *fig.* 3 se

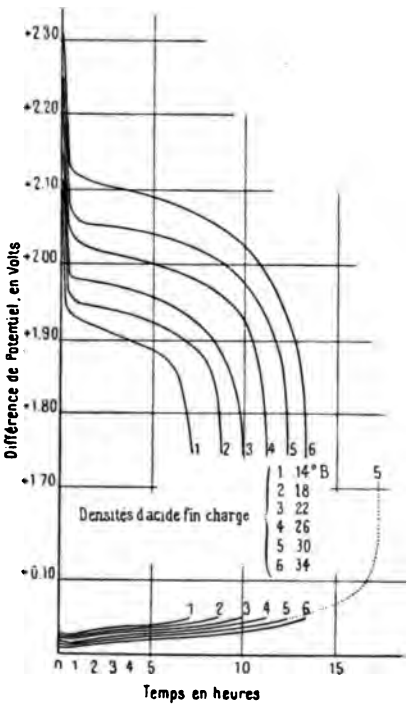

FIG. 2.

rapportent à la charge des mêmes éléments. On voit que la tension anodique finale est d'autant plus élevée que la concentration est plus forte ; c'est l'inverse qui a lieu pour la tension cathodique, de sorte que la différence de potentiel finale aux bornes varie très peu avec la concentration. Pour les mêmes raisons qu'en décharge, les courbes des négatives diffèrent peu pendant la première partie. Les valeurs obtenues pour la tension cathodique à la fin de la charge montrent que la surélévation de tension que nécessite le dégagement d'hydrogène est d'autant plus faible que la concentration de l'acide est élevée, de telle sorte que, pour un acide suffisamment concentré, il peut

y avoir décharge immédiate des ions $\overset{+}{H}$, ce qui concorde avec ce fait que le plomb s'attaque davantage par les acides concentrés.

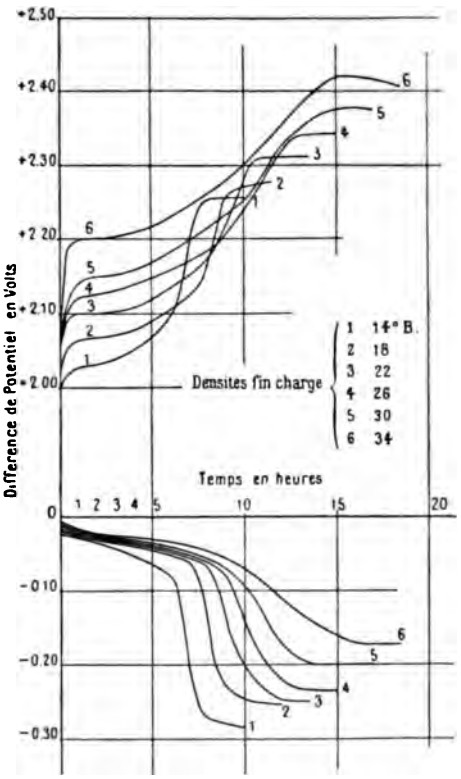

Fig. 3.

La différence de potentiel aux bornes varie avec l'intensité. En pratique, cette variation peut être étudiée à deux points de vue différents. Ou bien on veut connaître la variation de la tension moyenne en fonction de l'intensité pour des décharges complètes, ou bien on veut avoir cette même variation pour des portions très courtes de décharge et de charge. Le premier cas se rapporte à l'utilisation la plus courante des accumulateurs; dans le second cas, c'est le fonctionnement des batteries-tampon que l'on envisage.

La *fig.* 4 montre l'allure des courbes de différence de potentiel moyenne en fonction de l'intensité, ou, ce qui revient au même, du temps

de décharge, la décharge étant complète. Les courbes en traits pleins se rapportent à la tension aux bornes, celles en traits pointillés aux tensions anodiques et cathodiques mesurées avec électrode auxiliaire au plomb. Ces courbes varient un peu avec le type de plaque étudié et surtout avec l'épaisseur de matière active qui travaille.

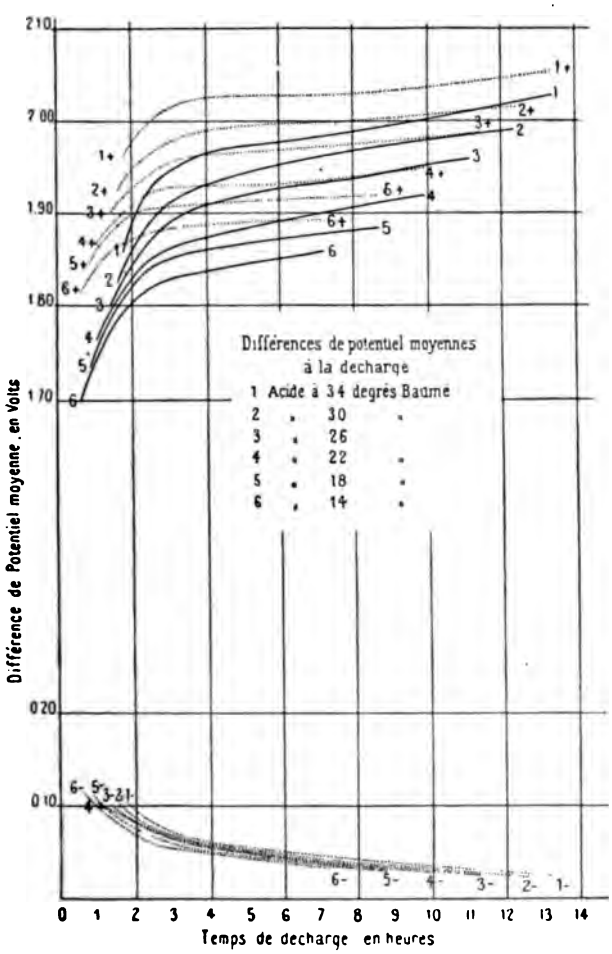

Fig. 4.

On sait que depuis quelques années on emploie beaucoup les batteries d'accumulateurs, dans les stations centrales de tramways

notamment, en les plaçant directement en parallèle avec les machines dans le but de régulariser à la fois la tension du réseau et le débit des génératrices. Le débit du réseau étant très variable, lorsqu'il sera inférieur au débit moyen le courant des génératrices chargera la batterie. Lorsque au contraire le débit du réseau deviendra supérieur au débit moyen des génératrices, la batterie devra débiter en parallèle avec celles-ci. Ce mode de fonctionnement impose aux machines certaines conditions qu'il serait trop long d'examiner ici. On comprend facilement que la condition imposée aux batteries est une tension aussi peu variable que possible avec l'intensité, et cela implique non seulement une faible résistance intérieure, mais encore une force électromotrice aussi peu variable que possible pendant les périodes successives de charge et de décharge. La courbe de variation de la tension aux bornes en fonction de l'intensité peut être

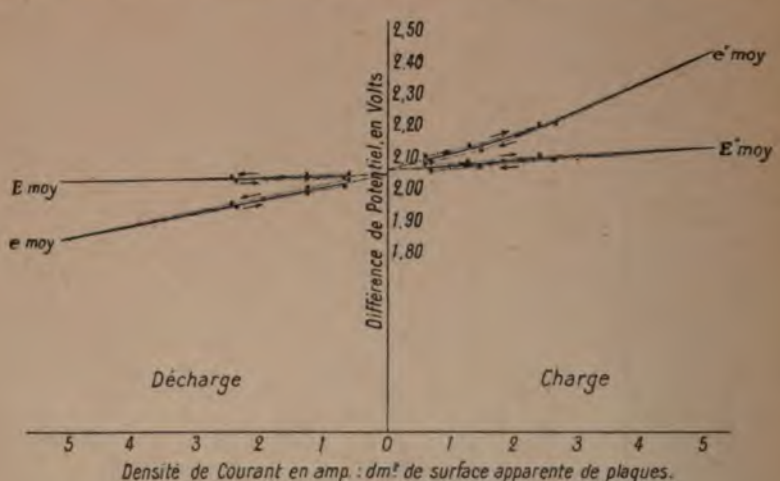

Fig. 5.

appelée caractéristique de l'accumulateur. La *fig.* 5 représente cette courbe. Avec une telle courbe, on doit indiquer évidemment le temps des périodes successives de charge et de décharge. Ici il était de trente secondes. La courbe $e_{moy}e'_{moy}$ se rapporte à la tension aux bornes, et $E_{moy}E'_{moy}$ à la force électromotrice pendant des périodes de trente secondes suivant la charge ou la décharge. Les courbes sont d'autant plus inclinées en effet que les périodes sont longues. Comme

on a affaire à des courbes qui sont presque des droites, on pourrait caractériser l'élément par le coefficient angulaire de la courbe de variation de la tension en fonction de l'intensité, auquel on pourrait donner le nom de résistance moyenne apparente. Dans l'exemple donné ici, on peut conclure que l'élément soumis pendant trente secondes à une différence de potentiel de 2,26 volts chargerait à une densité moyenne de courant de 3 ampères par décimètre carré.

Remarquons ici que ces caractéristiques dépendent de l'état de charge ou de décharge de l'accumulateur. Pour les avoir aussi peu inclinées que possible, il ne faut se placer vers aucune des deux positions fin décharge ou fin charge, qui sont instables.

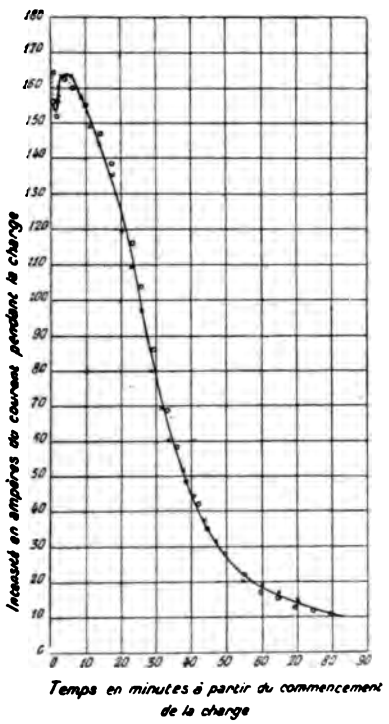

Fig. 6.

Un autre problème qui se rattache indirectement à l'influence de l'intensité sur la différence de potentiel aux bornes est celui de la charge des éléments à potentiel constant. Si on applique aux bornes

d'un élément une tension constante et supérieure à sa force électromotrice, cet élément se chargera à une intensité qui ira évidemment en décroissant suivant une courbe telle que celle indiquée par la *fig.* 6. L'intensité tend vers une constante lorsque l'élément est chargé, puisqu'on a à chaque instant $I = \frac{U - E}{r}$, U étant la tension constante appliquée, et que E et r tendent à des valeurs constantes. On remarque fréquemment au début une chute brusque de l'intensité suivie d'un relèvement. Peut-être faut-il attribuer ce fait à la diminution de résistance au début de la charge, diminution qui peut être accentuée par un dégagement de chaleur dû à l'effet Joule dans les pores de la matière, l'intensité étant très élevée.

A propos de la charge à potentiel constant, disons que c'est le mode de charge le plus rationnel de l'élément. Au point de vue du rendement comme au point de vue de la conservation des plaques, il est préférable au mode de charge à intensité constante si on compare à temps de charge égal. Il permet aussi dans des cas spéciaux de recharger un élément partiellement ou complètement dans un temps court.

Capacité de l'accumulateur au plomb. — Un des facteurs les plus importants à considérer en pratique est celui de la capacité. C'est surtout sur la capacité Q que l'on peut agir pour augmenter l'énergie eQ dont dépendent les applications possibles de l'accumulateur. On sait qu'on appelle capacité totale utilisable celle que l'on obtient jusqu'au crochet de la courbe de décharge (diff. de pot. aux bornes en fonction du temps de décharge). Ce crochet se produit en moyenne à 1,80 volt; mais il varie entre 1,70 et 1,90 volt avec l'intensité de décharge et la concentration de l'acide.

Un premier point à examiner, c'est la façon dont on utilise la matière active. Lorsqu'on est en présence d'une électrode soluble, le zinc par exemple, l'utilisation de la matière est théorique et, aux actions locales près, la capacité de l'électrode est donnée par le chiffre théorique $1^{gr},2$ par ampère-heure, c'est-à-dire qu'une électrode de 1.200 grammes zinc pourra fournir 1.000 ampères-heures. Avec les matières actives insolubles et se modifiant comme celles de l'accumulateur au plomb, il n'en est pas ainsi, et, s'il est vrai qu'un ampère-heure engage, comme l'indique la théorie, $3^{gr},86$ de plomb spongieux et $4^{gr},46$ de peroxyde (toujours aux actions locales près), on ne peut pas dire qu'un poids P de plomb spongieux pourra donner $\frac{P}{3,86}$ ampères-

heures. On peut appeler coefficient d'utilisation de la matière active le rapport entre la capacité que peut donner une électrode et la capacité théorique $\frac{P}{3,86}$ ou $\frac{P}{4,46}$. Je lais e de côté ici l'électrolyte, qui, dans l'accumulateur au plomb, doit être considéré comme une matière active, puisque sa consommation, d'après la double sulfatation, est $3^{gr},66$ H^2SO^4 par ampère-heure ; mais, en pratique, les quantités d'acide sulfurique employées sont considérablement plus élevées que les quantités théoriques, et l'électrolyte ne limite pour ainsi dire jamais la capacité.

En pratique, quand une décharge est terminée et qu'on se trouve au crochet de la courbe, on constate que la plus grande partie du peroxyde et du plomb spongieux est restée inutilisée et que l'électrolyte renferme encore un très grand excès d'acide sulfurique. Si la capacité est limitée malgré cette abondance de matières actives, cela tient le plus souvent à ce que l'acide sulfurique, quoiqu'en excès dans le liquide extérieur, est bientôt en défaut à l'intérieur des pores de la matière. En effet, la consommation de H^2SO^4 est sensiblement proportionnelle au nombre d'ampères-heures débités, tandis que la diffusion ou les courants de concentration (que nous verrons plus loin) amènent à l'intérieur une quantité de H^2SO^4 qui va sans cesse en diminuant lorsque les lignes de courant pénètrent plus profondément dans la matière active. La section des pores devient en effet de plus en plus petite par suite de la formation du sulfate.

Dans certains cas cependant (faibles densités de courant, faibles épaisseurs de matière) et surtout pour les négatives, la capacité peut être limitée par la grosseur des cristaux de matière ; chaque cristal ne travaillant qu'en surface, plus les cristaux sont gros et plus faible est l'utilisation de la matière active.

Pour ces raisons, le coefficient d'utilisation est toujours très inférieur à 1 en pratique. Des expériences nous ont montré que, pour obtenir le coefficient très élevé 0,6, qu'il ne paraît pas possible de dépasser, il faut se placer dans des conditions exceptionnelles : décharges excessivement lentes, très faible épaisseur, grande porosité de la matière active, etc. En pratique, le coefficient d'utilisation est le plus souvent compris entre 0,1 et 0,35.

En partant du coefficient d'utilisation maximum 0,6, on déduit pour le poids de matières actives par ampère-heure $\frac{3,86 + 4,46}{0,6} = 13^{gr},86$

et pour le poids minimum de plaques $\frac{13,86}{0,65} = 21^{gr},32$ par ampère-heure, le support de la matière entrant au moins pour 35 0/0 dans le poids de la plaque. Le coefficient d'accessoires étant au moins égal à 1,5, le poids d'élément devient $21,32 \,.\, 1,5 = 32$ grammes par ampère-heure. On en déduit pour l'énergie massique maximum de l'accumulateur au plomb $\frac{2.1000}{32} = 62$ watts-heures par kilogramme d'élément. Les accumulateurs au plomb les plus légers actuellement construits n'atteignent que 30 à 40 watts-heures par kilogramme.

La capacité dépend considérablement de l'intensité de décharge. Cette dépendance, connue depuis très longtemps, se comprend très bien, puisque la consommation de H^2SO^4 pendant l'unité de temps croît proportionnellement à l'intensité, alors que les quantités d'acide diffusé, d'après la loi de Fick, ne peuvent suivre la même loi. On a donné des formules empiriques reliant la capacité à l'intensité. Celle de Peukert se traduit par $I^n \cdot t =$ constante, d'où $C_1 = C \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1}$, le coefficient n variant de 1,25 à 1,60 environ avec les différents types. D'autres lois ont été proposées; citons notamment celle de Dolezalek, $C = \frac{B}{A + I}$ (A et B étant des constantes), déterminée en appliquant la loi de Fick. Mais toutes ces formules ne servent guère en pratique, car elles ne sont que très approchées. On s'en rapporte bien plutôt aux courbes de variation de la capacité en fonction de l'intensité déterminées par expériences. On trouve que les plaques à grande surface donnent une capacité plus constante en fonction de l'intensité que les plaques à grande épaisseur de matière. En général, la capacité des négatives baisse plus vite que celle des positives.

La capacité dépend de l'épaisseur de la matière active qui travaille. Ici aussi on peut donner des formules empiriques plus ou moins approchées; mais ce n'est encore qu'à l'expérience qu'on peut s'en rapporter. Les *fig.* 7 et 8 représentent des courbes que nous avons tracées à cet effet, la première relative à des plaques positives, et la deuxième à des plaques négatives. Toutes ces plaques, du type à grille, étaient en tous points semblables, et ne différaient que par l'épaisseur de la matière active. Comme les épaisseurs portées sont celles des plaques elles-mêmes, l'épaisseur sous laquelle la matière

active travaille est évidemment la moitié de cette valeur. Pour les positives, dans les limites de nos essais, les courbes sont sensiblement des droites dont le coefficient angulaire diminue lorsqu'on fait croître l'intensité du courant. Plus l'intensité est élevée et moins on

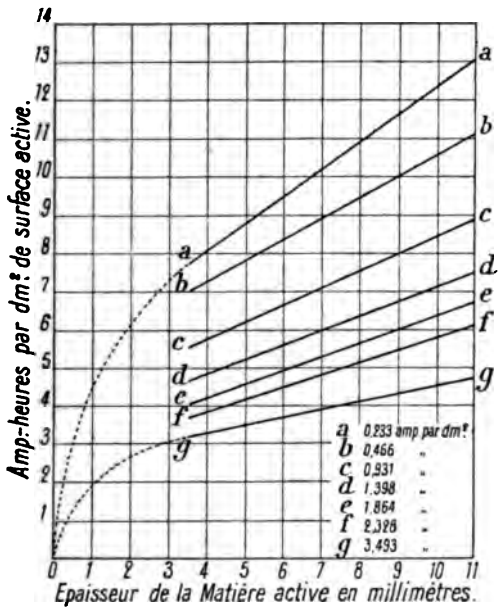

Fig. 7.

gagne au point de vue de la capacité à prendre des épaisseurs croissantes de matière active. Ceci se comprend très bien, puisque c'est dans le cas des décharges lentes que la diffusion joue le plus grand rôle; l'augmentation de capacité en fonction de l'épaisseur doit donc être plus rapide dans le cas des décharges lentes que dans celui des décharges à haute intensité. Pour les négatives correspondantes, les capacités croissent plus rapidement que celles des positives aux régimes faibles et plus lentement aux régimes élevés.

La porosité de la matière active exerce une très grosse influence sur la capacité. C'est d'elle en effet que dépend la section plus ou moins grande offerte par les pores, et, par suite, la diffusion plus ou moins active et le coefficient d'utilisation plus ou moins grand. Examinons les conditions à réaliser pour obtenir la plus grande porosité

possible. On peut appeler densité apparente de la matière active le rapport de la masse de Pb ou PbO^2 au volume total occupé. La porosité peut alors être exprimée par le rapport entre la densité réelle et la densité apparente. La densité apparente du plomb spongieux ou

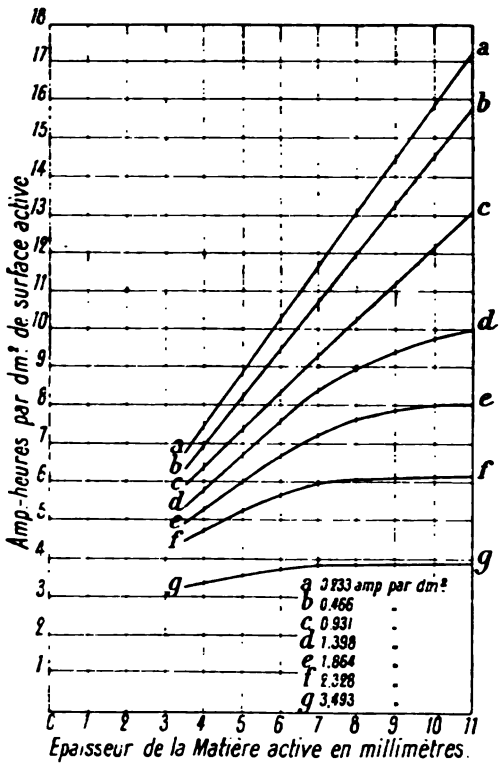

Fig. 8.

du peroxyde doit dépendre évidemment : 1° de la densité apparente du sel ou de l'oxyde de plomb employé pour l'empâtage; 2° du rapport entre le poids moléculaire du plomb ou du peroxyde et celui du sel ou de l'oxyde employé; 3° de l'addition de substances étrangères solubles ou volatiles. On connaît les densités réelles des principaux composés du plomb employés :

Plomb métallique.	11,4
Minium	8,9
Litharge.	9,3
Peroxyde.	9,4
Sulfate de plomb.	6,2
Chlorure de plomb fondu . . .	5,7

Pour les substances pulvérisées, comme le minium ou la litharge, qui sont le plus fréquemment employées, la densité apparente obtenue en tassant à la main est beaucoup plus faible que la densité réelle; elle est en général comprise entre 4 et 4,5, mais elle varie avec le degré de pulvérisation, et peut être inférieure à 4. La matière active sera évidemment d'autant plus poreuse que la substance employée aura une densité apparente moindre. L'influence du poids moléculaire de la substance initiale résulte du tableau suivant :

Substances	Formules	Masses moléculaires	Rapport des masses moléculaires pour 1 Pb
Plomb métallique. . .	Pb	207	1,00
Minium	Pb^3O^4	3.228	1,10
Litharge	PbO	223	1,08
Peroxyde	PbO^2	239	1,15
Sulfate de plomb. . .	$PbSO^4$	303	1,46
Chlorure de plomb. .	$PbCl^2$	278	1,34

On peut conclure que c'est le sulfate qui donne la plus grande porosité, puis le chlorure et les oxydes dans l'ordre décroissant d'oxydation. Dans les empâtages d'oxydes et d'acide sulfurique, on aura donc intérêt, au point de vue de la capacité, à partir d'un oxyde aussi élevé que possible, et à former le plus possible de sulfate de plomb. Nous avons reconnu d'ailleurs par des expériences la validité des lois qui viennent d'être indiquées.

La capacité est dépendante de l'état moléculaire de la matière active. A notre connaissance, personne n'a encore signalé ce phénomène qui s'exerce surtout à la négative, peut-être parce que la concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ est beaucoup plus grande et peut varier dans de bien plus grandes limites que celle des ions $\overset{--}{PbO^2}$. Il est extrêmement remarquable qu'une négative, par exemple, fabriquée dans les mêmes conditions, et ayant par conséquent même densité apparente de matière, donne des capacités très différentes selon les conditions dans lesquelles on aura opéré la réduction. Cela tient aux différences d'état moléculaire du plomb, et très certainement à la grosseur variable des cristaux de plomb spongieux. Prenons, par exemple,

des plaques exactement semblables et garnies de chlorure de plomb, dont l'insolubilité dans l'eau est bien moindre, comme on sait, que celle du sulfate. En réduisant ces plaques par le zinc, en constituant un couple, on aura des cristaux d'autant plus gros que, pour la même concentration de l'électrolyte, l'intensité de réduction sera faible, et la capacité que donnera ensuite la plaque sera d'autant plus faible qu'aura été petite l'intensité de réduction. C'est ce que montrent nettement les courbes de la *fig.* 9. Avec le sulfate de plomb lui-même, il est possible de créer par des différences de solubilité des grosseurs

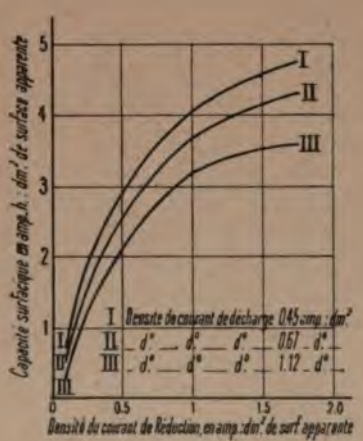

Fig. 9.

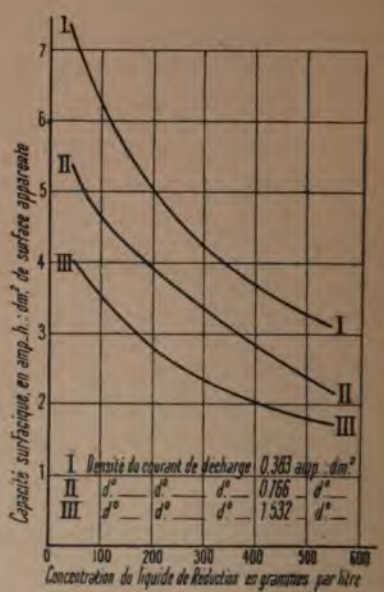

Fig. 10.

variables des cristaux et des capacités variables. Les courbes de la *fig.* 10 se rapportent à des plaques dont l'empâtage était à base d'oxydes et de sulfate et pour lesquelles on a opéré la réduction à la même intensité, mais dans un sulfate alcalin de concentration variable, le sulfate de plomb envoyant en solution dans ce sulfate alcalin plus d'ions $\overset{++}{Pb}$ que dans l'acide sulfurique.

La concentration de l'acide sulfurique a sur la capacité une influence connue depuis longtemps, mais qui n'a été précisée que dans ces dernières années. Dolezalek avait admis que le maximum

de capacité doit correspondre au maximum de conductibilité de l'acide. On peut supposer en effet que les lignes de courant pénètrent peu à peu dans l'intérieur de la matière, de telle façon que la baisse de force électromotrice des couches extérieures correspond à la perte en volts rI dans les pores. Pour une même baisse de tension, les lignes de courant auront donc pénétré d'autant plus profondément, c'est-à-dire la capacité sera d'autant plus grande, que la résistivité de l'acide sera faible dans les pores. En pratique, on constate, comme nous l'avons déterminé dans les courbes de la

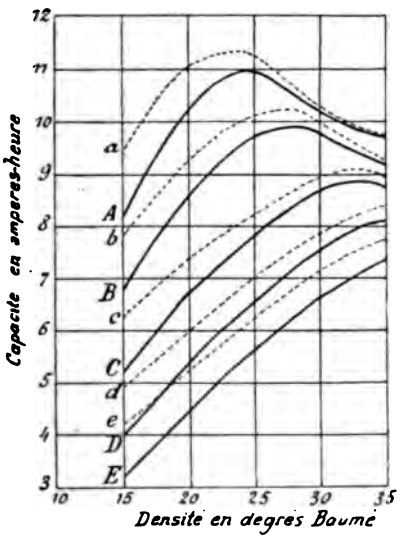

Fig. 11.

fig. 11, que la concentration qui procure le maximum de capacité varie avec l'intensité de décharge. Ces courbes se rapportent à des plaques de 10 centimètres de côté déchargées aux intensités $0^{amp},5$ (courbes A*a*), $0^{amp},75$ (B*b*), $1^{amp},25$ (C*c*), 2 ampères (D*d*) et 3 ampères (E*e*). Les courbes en traits pleins indiquent les capacités jusque 1,80 volt ; celles en traits pointillés, les capacités jusque 1,70 volt. Plus l'intensité est grande, plus le maximum se recule vers les fortes concentrations d'acide.

Si on détermine, comme nous l'avons fait dans les *fig.* 12 et 13, les mêmes courbes relatives, les premières aux positives, les secondes

aux négatives, on trouve que, pour les mêmes intensités $0^{amp},5$ (A), 1 ampère (B), 2 ampères (C), 4 ampères (D), les maxima se produisent toujours à des concentrations plus faibles pour les négatives que pour les positives. Ces phénomènes peuvent s'accorder avec l'explication donnée plus haut, si on envisage les conditions de résistivité minimum, non de l'acide extérieur, mais de l'acide des pores. A la positive, la densité moyenne 1,2 dans les pores pourra n'être pas dépassée, même en adoptant des concentrations extérieures

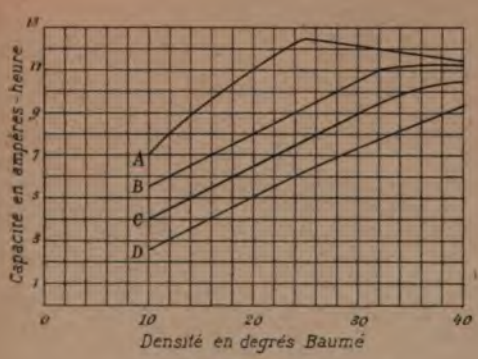

Fig. 12.

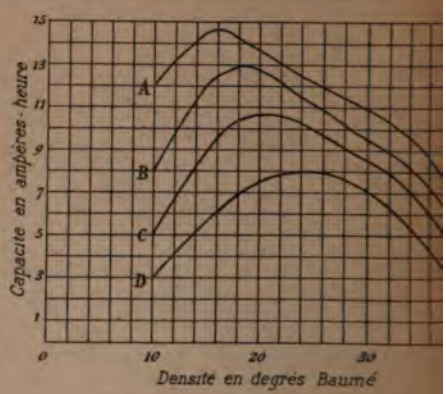

Fig. 13.

très élevées, si l'intensité est suffisante pour faire disparaître plus d'acide que n'en amène la diffusion. Si, à la négative, les concentrations procurant le maximum de capacité sont inférieures à celles des positives, c'est que la concentration dans les pores s'enrichit non seulement de l'acide diffusé, mais encore de l'électrolyse des ions SO^4 vers la négative pendant la décharge.

Les états antérieurs ont sur la capacité une influence que nous avons mise en lumière en 1898. Lorsqu'on décharge un élément dans les mêmes conditions de concentration et d'intensité, on trouve une capacité variable avec la décharge précédente. En traçant les courbes de capacité pour un cycle complet d'intensités, on trouve l'allure *abcde* de la *fig.* 14. Il se produit un véritable phénomène d'hystérésis qui peut très bien s'expliquer de la façon suivante : après une décharge lente, la quantité d'acide libéré dans les pores de la matière est plus grande qu'après une décharge rapide. Comme la diffusion ne se fait qu'imparfaitement, la matière disposera pendant

la décharge après le premier cas d'une quantité d'acide supérieure à celle disponible après la décharge rapide.

Remarquons ici que tout ce que nous avons dit de la diffusion peut être attribué aussi aux courants de concentration signalés par Dolezalek et qui ont les mêmes effets que la diffusion. Les matières

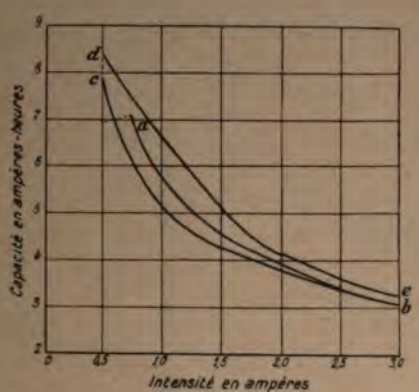

Fig. 14.

actives, étant imprégnées intérieurement et extérieurement de solutions d'acide de concentration différente, peuvent être assimilées à deux éléments de concentration inégale placés en opposition, la matière active formant le conducteur qui les relie. Celui de concentration plus forte ayant une force électromotrice supérieure va se décharger, tandis que l'autre se chargera, de sorte que les concentrations tendront à s'égaliser comme sous l'influence de la diffusion.

La température a une influence très notable sur la capacité, qu'elle fait croître. Là encore il faut voir une action de la diffusion, la quantité d'acide sulfurique diffusé augmentant, toutes choses égales d'ailleurs, de 2,4 0/0 par degré C., ou encore une action des courants de concentration, la résistivité de l'acide diminuant de 1,36 à 1,78 0/0 par degré entre les densités d'acide 1,10 et 1,30. Le coefficient de température de l'accumulateur, augmentation de la capacité par degré C., dépend surtout du type de plaque et de l'intensité de décharge. C. Liagre a trouvé un coefficient variant de 0,5 à 4,5 0/0 pour des plaques à grande surface. Nous avons trouvé des valeurs différentes pour des plaques empâtées. Les courbes de la *fig.* 15 et celles de la *fig.* 16 indiquent respectivement les variations de capacité avec la température pour des

positives (*fig.* 15) et pour des négatives (*fig.* 16) à grille mince empâtée. Pour les premières, le coefficient, entre 20 et 40° C., est, dans l'ordre des intensités croissantes indiquées, 0,56 0/0, 0,75 0/0, 1,06 0/0 et 0,96 0/0. Pour les négatives, on trouve la variation plus rapide 0,1 0/0, 1,02 0/0, 1,65 0/0 et 2,27 0/0. La diffusion insuffisante limitant d'autant plus la capacité que l'intensité de décharge est élevée, on comprend très bien l'influence plus considérable de la

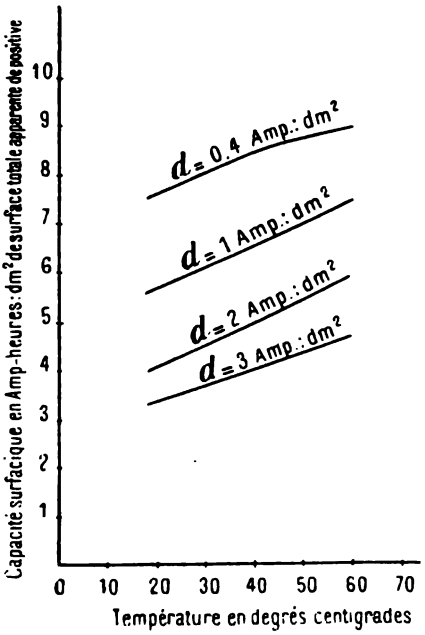

Fig. 15.

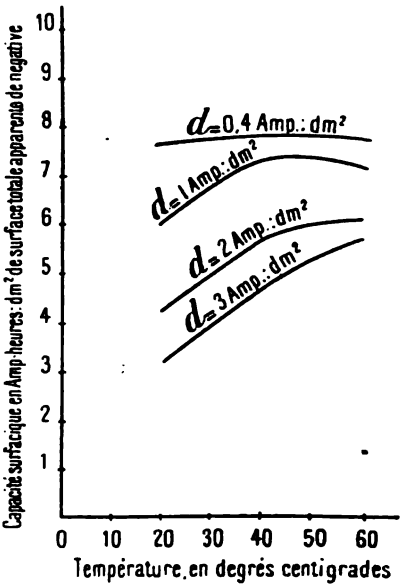

Fig. 16.

température aux régimes élevés. Dans les deux courbes, on constate que, pour les régimes très lents, la courbe s'incurve vers l'axe des X, parce que, pour ces régimes lents, la capacité ne peut monter indéfiniment, elle tend vers une limite déterminée par la quantité de matière active. Sur les courbes de la *fig.* 16, on constate même que, pour les régimes lents, la capacité diminue à partir d'une certaine température. Nous avons reconnu que ce fait est imputable à l'augmentation des actions locales, très importante aux négatives. Les courbes de décharge des positives données en *fig.* 17 sont très intéressantes à examiner. Elles se rapportent à la densité de courant

0,775 ampère par décimètre carré et montrent nettement l'influence de la température sur la diffusion. La courbe débute à une valeur

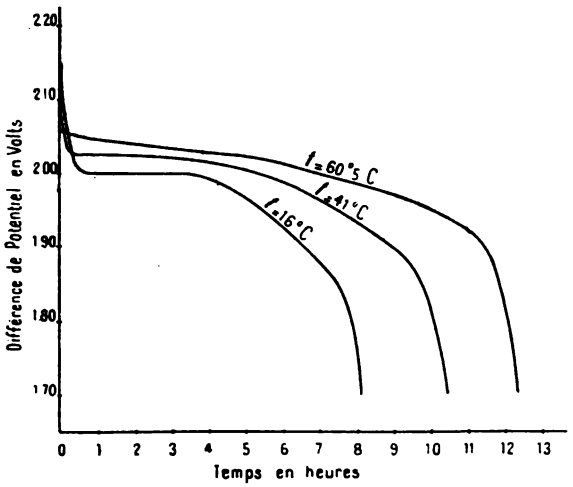

Fig. 17.

d'autant plus faible et se maintient ensuite à une valeur d'autant plus élevée que la température est élevée, celle-ci agissant à la fois sur la

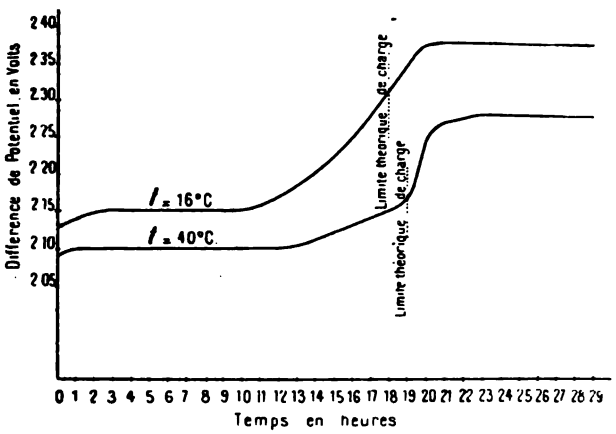

Fig. 18.

résistance intérieure, qu'elle diminue, et sur la force électromotrice, qu'elle tend à maintenir plus élevée (par suite de la diffusion). Les

courbes de la *fig.* 18 se rapportent à la charge à des températures différentes de deux positives déchargées dans les mêmes conditions. Pour les mêmes raisons que ci-dessus, la courbe relative à la température de 40° se place sous celle à 16°. Dans ces deux dernières figures, les tensions indiquées sont les tensions anodiques.

Le chauffage des éléments en vue de l'augmentation de capacité n'est pas appliqué en pratique, à cause surtout de l'influence néfaste sur les négatives au point de vue des actions locales et de la durée.

Une augmentation légère de la température peut être avantageusement employée dans les batteries-tampons pour diminuer le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ entre les tensions moyennes en décharge et en charge.

Durée des plaques de l'accumulateur au plomb. — Au point de vue économique, il est très intéressant d'examiner la durée des plaques. Celle-ci dépend non seulement de la dégradation possible, mais encore de la baisse de capacité. Si on étudie les positives à ce point de vue, on peut les ranger en trois grandes classes :

1° Plaques à grande surface ou plaques genre Planté, caractérisées par un support en plomb doux, capable par conséquent de se peroxyder peu à peu, ce support étant très développé et recouvert par un procédé de formation quelconque d'une couche excessivement mince de peroxyde, qui travaille ainsi sous une très faible épaisseur (souvent inférieure au $\frac{1}{10}$ de millimètre) ;

2° Plaques empâtées, ou plaques genre Faure, caractérisées par un support en alliage inoxydable (généralement plomb antimonieux) présentant des alvéoles de forme quelconque que l'on remplit de matière active, travaillant ainsi sous une épaisseur qui peut être assez élevée et atteint toujours plusieurs millimètres ;

3° Plaques mixtes, ou plaques genre Faure-Planté, caractérisées par un support en plomb doux, par conséquent peroxydable, présentant des alvéoles que l'on garnit de matière active, qui travaille sous forte épaisseur, comme les précédentes, au début.

Si on prend une plaque à grande surface qui a été peu formée au début, on trouve que sa capacité croît avec le nombre de décharges jusqu'à ce que la couche de peroxyde obtenu ait atteint une épaisseur suffisante pour s'opposer à la peroxydation plus profonde. A partir de ce moment, celle-ci ne se fait plus qu'au fur et à mesure de la chute du peroxyde. La capacité ne subit plus que des fluctua-

tions qui dépendent des conditions de fonctionnement; selon que celles-ci sont favorables à une formation plus profonde ou à une chute plus active de matière, la capacité augmente ou diminue. Cependant, en général, cette capacité reste au-dessous de 1 ampère-heure par décimètre carré. Ces phénomènes se produisent jusqu'à ce que le support en plomb doux ne renferme plus suffisamment de métal pour assurer la solidité mécanique et la conductibilité électrique; la plaque est alors usée. Si la plaque a été trop profondément formée au début, la capacité peut baisser au début comme dans le cas des plaques empâtées.

En général, avec les positives empâtées, la capacité est maximum au début du fonctionnement. Elle baisse avec le nombre de décharges par suite de la chute de matière active que rien ne vient compenser. Dans bien des cas, cependant, lorsque la matière active n'a au début qu'une porosité insuffisante, la capacité commence par croître pour passer par un maximum d'où elle descend, comme nous venons de le voir.

Les plaques mixtes travaillent comme les précédentes au début; mais, lorsque la matière active tombe, la capacité, au lieu de baisser comme dans le cas précédent, peut rester constante ou même augmenter, par suite de la peroxydation progressive du support en plomb doux. La capacité restera constante ou augmentera selon le développement plus ou moins grand du support.

C'est donc la chute de matière active qui, dans tous les cas, limite la durée des positives. Ce phénomène, qui paraît inévitable, et que l'emploi d'enveloppes poreuses ne peut que retarder, provient en partie du foisonnement. On appelle ainsi l'augmentation de volume que subit la matière active pendant son fonctionnement. Si on se rappelle que la densité du sulfate de plomb est 6,2, celle du peroxyde 9,4, une molécule de peroxyde occupant un volume 1 au début de la charge occupera, après sulfatation à la fin de la décharge, $\frac{303 \,.\, 9,4}{239 \,.\, 6,2} = 1,925$. Si on suppose un coefficient d'utilisation de 0,5, l'augmentation du volume total de matière pendant la décharge se fera dans le rapport $0,5 + 0,5 \,.\, 1,925 = 1,46$, qu'on peut appeler le coefficient de foisonnement cubique. Si la densité apparente du peroxyde est supérieure à $\frac{9,4}{1,46}$, il y aura augmentation du volume apparent de la matière et la plaque se déformera sous l'influence de

la pression ainsi exercée. Dans tous les cas, d'ailleurs, une modification importante au point de vue physique se sera produite d'une charge à la suivante. On peut considérer en effet le peroxyde initial comme constitué d'une série de cristaux d'une certaine grosseur séparés par des pores ; après une décharge, la partie superficielle de ces cristaux sera sulfatée et aura, par suite, augmenté de volume. Lors de la charge suivante, ce sulfate va régénérer du peroxyde, mais non plus sous la forme du cristal unique qui lui a donné naissance. Ce cristal primitif aura diminué de volume et sera recouvert d'une série de cristaux plus petits séparés entre eux par des pores.

La matière positive se transforme peu à peu en cristaux de plus en plus petits et de plus en plus nombreux, de sorte que l'adhérence de cette matière devient de plus en plus précaire, et les bulles d'oxygène formées à la fin de la charge détachent facilement les fines particules de matière qui tombent au fond du bac.

Si on calcule comme précédemment le foisonnement en partant du plomb métallique du support, on trouve pour un volume 1 de plomb un volume 2,045 de matière à la fin de la décharge.

On comprend que dans ces conditions le foisonnement exerce sur le support des efforts puissants et répétés et qui ont d'autant plus d'action que la ténacité du plomb doux est faible et que les nervures actives ont acquis une faible section. C'est la raison des déformations (allongement et gondolement des plaques en plomb doux).

Indépendamment de certaines influences (forme du quadrillage, composition de l'empâtage, densité de courant, impuretés de l'électrolyte, concentration de l'acide, température), influences que nous avons pu étudier, on peut dire que la durée d'une positive est d'autant plus grande que l'épaisseur de matière active est plus forte s'il s'agit de plaques empâtées, et que les nervures actives en plomb doux sont plus épaisses s'il s'agit de plaques à grande surface. Comme dans le premier cas, la matière est d'autant mieux utilisée qu'elle travaille sous plus faible épaisseur et que, dans le second cas, la capacité dépend, pour une même formation, uniquement de la surface des nervures actives et non de l'épaisseur du plomb ; il en résulte que la durée ne peut être augmentée qu aux dépens de la capacité spécifique.

C'est d'ailleurs là une loi générale, tout facteur agissant dans un sens sur la capacité spécifique agit en sens inverse sur la durée.

En pratique, la durée des positives oscille entre une centaine de

décharges complètes pour les plaques empâtées à très grande capacité spécifique (20 à 25 ampères-heures par kilogramme d'électrodes) servant pour les automobiles et un millier de décharges complètes pour les plaques à grande surface ou les plaques mixtes qui servent dans les installations à poste fixe et n'ont pas plus de 5 à 10 ampères-heures par kilogramme d'électrodes. Ces durées sont d'ailleurs très variables avec les conditions d'exploitation, et on peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que celles qui viennent d'être indiquées si les décharges ne sont que partielles.

Les plaques négatives se comportent tout différemment des positives au point de vue de la durée. D'une façon générale ces plaques baissent de capacité en fonction du nombre de décharges plus rapidement au début, plus lentement ensuite. Certaines négatives, cependant, telles que celles en plomb provenant du chlorure par exemple, ont une capacité presque constante et quelquefois même augmentant au début du fonctionnement. En même temps que la capacité baisse dans les négatives, on constate non pas une chute de matière (du moins en général), mais une contraction de cette matière.

Il est probable que, dans les charges successives, les ions $\overset{++}{Pb}$ se déchargent à la négative en donnant des cristaux très petits de plomb qui viennent peu à peu boucher les pores en certaines parties et donnent finalement une matière de plus grande densité apparente, tandis qu'en d'autres parties il se forme des crevasses. Ce phénomène peut être évité ou très atténué par un état moléculaire spécial du plomb au début.

La durée des négatives dépend des régimes de décharge et de charge, de la concentration de l'acide, de l'épaisseur de la matière active, de l'état de pureté de l'acide, de la température, etc.

En pratique, la durée des négatives est toujours très grande (quelquefois plus de dix ans dans les plaques à poste fixe) lorsqu'on les fait fonctionner jusqu'à leur dégradation en consentant à une diminution de capacité. Pour les négatives très légères, la durée peut être inférieure à un an, si une baisse trop sensible de capacité n'est pas permise.

Actions locales de l'accumulateur au plomb. — On sait qu'on appelle ainsi les actions chimiques qui s'accomplissent à l'intérieur d'un élément sans donner lieu à de l'énergie utilisable.

Parmi ces actions il y a à considérer l'attaque directe du plomb spongieux par l'acide sulfurique, attaque d'autant plus importante

que la concentration de l'acide est élevée, comme l'indiquent les courbes de la *fig.* 19, dans lesquelles on a suivi la sulfatation de deux mêmes plaques négatives en plomb spongieux pur plongées dans des solutions sulfuriques pures de densité 1,32 (courbe 1) et 1,19 (courbe 2). Cette sulfatation croît très rapidement lorsqu'on élève la température.

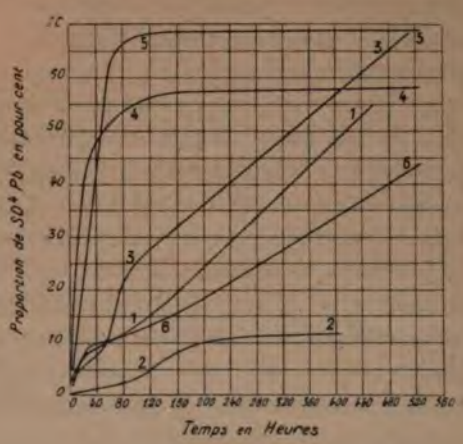

Fig. 19.

Les actions chimiques directes à la positive sont très faibles ; dans les cas où il se produit des traces de corps suroxygénés, eau oxygénée ou acide persulfurique, une petite quantité de peroxyde peut être ramenée à l'état d'oxyde inférieur sulfaté ensuite.

A côté de ces actions, il y a à considérer les actions électrochimiques. Celles-ci se produisent entre le support et la matière active, qui, n'étant pas semblables, donnent lieu à des couples. A la négative, ces actions sont très faibles, puisque entre le plomb spongieux et les alliages de plomb du support n'existe qu'une force électromotrice très faible. Il n'en est pas ainsi à la positive, où le peroxyde est en contact avec le plomb doux ou les alliages de plomb et où par conséquent le couple parasite a une force électromotrice égale à celle de l'accumulateur. C'est pour cette raison qu'une positive à grande surface peu formée perd très rapidement sa capacité. Lorsque l'épaisseur de matière active augmente, l'action de ce couple devient de plus en plus faible. Elle est plus faible encore dans les plaques empâtées lorsque le quadrillage s'est peroxydé superficiel-

lement par suite de la surface de contact plus faible entre la matière active et son support. Ces actions électrochimiques dépendent évidemment de la concentration de l'acide, de la température, du type de plaques, etc.

Les actions locales les plus importantes sont certainement celles qui sont dues aux impuretés que l'on peut rencontrer dans les différentes substances qui constituent l'élément et notamment dans l'acide. Il y a deux façons de mesurer les actions locales ainsi produites : la première consiste à déterminer les proportions de matière active qui entrent en action chimique lorsque l'élément reste au repos ; la deuxième, la plus pratique, consiste à déterminer le rapport entre la capacité que possède encore l'élément après un repos déterminé et sa capacité lorsque la décharge suit immédiatement la charge.

En opérant ainsi avec des plaques empâtées fonctionnant dans un acide de densité 1,25 (29° B.), valeur parmi les plus élevées de celles employées, nous avons trouvé qu'avec le degré de pureté ordinaire de l'acide les pertes à circuit ouvert de la positive sont très faibles ; ainsi, en trente-cinq jours, avec un acide ordinaire renfermant comme impuretés en grammes par litre 0,05 Fe, 0,072 HCl, 0,01 As, 0,075 Az^2O^5, la perte de capacité n'était que de 3 0/0, exactement comme avec un acide chimiquement pur. A la négative, les pertes étaient plus considérables et, avec ce même acide ordinaire, la capacité avait baissé de 18 0/0 en vingt jours, tandis que l'acide chimiquement pur avait procuré une baisse de 10 0/0. Mais, lorsque les impuretés s'accroissent dans des proportions anormales, la perte de capacité à la positive comme à la négative peut devenir plus importante.

L'acide nitrique n'a pas d'influence sensible sur le peroxyde, mais il attaque le plomb spongieux de la négative, qui, en présence de l'acide sulfurique, donne du sulfate de plomb avec régénération de l'acide nitrique. L'acide chlorhydrique agit de la même façon sur la négative; en outre, il attaque le peroxyde de la positive avec dégagement de chlore et régénération d'une partie de l'acide chlorhydrique du chlorure de plomb qui se transforme en sulfate. Ces deux impuretés tendent d'ailleurs à s'éliminer peu à peu par électrolyse, l'acide nitrique en bioxyde d'azote au pôle négatif et l'acide chlorhydrique sous forme de chlore au pôle positif, jusqu'à n'exister plus qu'à l'état de traces. L'arsenic, dont le rôle est moins important, s'élimine aussi en partie. Seul le fer est fixe, et son action néfaste est due aux deux degrés d'oxydation qu'il prend successivement au contact des deux

électrodes d'après les réactions :

$$2FeSO^4 + PbO^2 + 2H^2SO^4 = Fe^2(SO^4)^3 + PbSO^4 + 2H^2O$$

et

$$Fe^2(SO^4)^3 + Pb = 2FeSO^4 + PbSO^4.$$

La diffusion du sulfate ferreux ou ferrique opère donc un véritable transport d'oxygène de la positive à la négative avec sulfatation aux deux pôles.

Pratiquement, il faut retenir que, pour assurer le mieux possible ce qu'on appelle la conservation de la charge, il faut prendre un acide aussi pur que possible et une concentration aussi faible que peut le permettre la capacité exigée.

Rendement de l'accumulateur au plomb. — Il y a lieu de distinguer deux rendements : le rendement en quantité ou en ampères-heures, rapport entre la quantité d'électricité débitée et la quantité chargée, et le rendement en énergie ou en watts-heures, rapport entre l'énergie fournie à la décharge et l'énergie absorbée à la charge.

Dans les meilleures conditions, le rendement en quantité peut atteindre 0,90 à 0,95. La perte provient de deux causes principales : 1° le dégagement gazeux inévitable à la fin de la charge et qui représente une perte en ampères-heures proportionnelle à la masse des gaz H et O électrolysés ; 2° les actions locales qui se produisent pendant toutes les périodes de fonctionnement (charge, décharge, repos) et correspondent à une perte de quantité d'électricité.

Ces deux causes expliquent clairement que le rendement en quantité dépende de l'intensité du courant de charge, de la densité de l'acide et de la pureté des matières. Un rendement de 0,90 à 0,95 ne peut être obtenu qu'à condition d'employer des substances pures, une concentration d'acide ne dépassant pas 25° B. ($d = 1,21$) et une densité de courant ne dépassant pas environ 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente de plaque.

En pratique on ne doit pas compter sur un rendement aussi élevé. Une bonne batterie ne donne guère qu'un rendement de 0,80 à 0,90 ; c'est qu'il faut compter avec l'intensité de charge qui est quelquefois assez élevée, avec les impuretés inévitables introduites dans l'acide, avec les intervalles de repos plus ou moins prolongés. Encore faut-il, pour obtenir ce rendement, que la batterie soit en bon état et qu'il n'y ait pas d'éléments en court-circuit.

Le rendement en quantité dépend beaucoup de la température

qui agit sur les actions locales, surtout à la négative. Dans des expériences que nous avons faites, pour un rendement de 0,85 à la température de 18° C. on n'avait que 0,80 à 42° C. et 0,69 à 61° C., toutes autres conditions restant semblables et la température de décharge seule étant variable.

Le rendement en énergie η peut se traduire facilement en fonction du rendement en quantité ρ par l'expression $\eta = \rho \frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$, en désignant par e_{moy} l'expression $\frac{1}{t}\int_0 edt$ se rapportant à la décharge et par e'_{moy} la valeur correspondante en charge. Ces expressions s'obtiennent aisément en intégrant les courbes de charge et de décharge (e en fonction de t) et en divisant par le temps de charge ou de décharge.

Connaissant ρ, il suffit d'examiner le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ pour en déduire η. Le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ baisse lorsque l'intensité croît. Cela est évident, puisqu'on a à tout instant $e = E - rI$ en décharge et $e' = E' + rI$ en charge. L'intensité n'agit d'ailleurs pas seulement sur le terme rI, mais encore sur le terme E, et, à cause des différences de concentration dans les pores de la matière active E, est d'autant plus faible à la décharge et plus élevé à la charge que le temps de ces opérations est moindre, c'est-à-dire que l'intensité est élevée.

En pratique, il y a deux cas particuliers à examiner, selon que l'élément subit des décharges et charges complètes (cas général) ou qu'il subit des décharges et charges partielles (cas des batteries-tampons).

Dans des expériences que nous avons faites dans des conditions variables de concentration d'acide et d'intensité de décharge, nous avons trouvé pour $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ correspondant à des décharges et charges complètes des valeurs montant de 0,861 à 0,871 pour les concentrations allant de 14 à 34° B., dans le cas d'une densité de courant de décharge de 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente. Avec les densités de courant croissantes, ces valeurs diminuaient ; ainsi, en prenant 2,5 ampères par décimètre carré, $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ montait de 0,774 à 0,800 entre 14 et 34° B.

On peut en conclure que, dans les limites de concentration employées

ordinairement, pour un même rendement en quantité, le rendement en énergie augmente avec la concentration. Avec un rendement de 0,90 en quantité, on a pour le rendement en énergie, d'après les chiffres ci-dessus, 0,775 à 0,784 pour la faible densité de courant et 0,697 à 0,721 pour la densité de courant élevée. Ces rendements doivent être considérés comme les plus élevés que l'on puisse obtenir en pratique.

Dans les batteries-tampons, l'étude du rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ pour les décharges et charges partielles successives est doublement utile, puisque plus ce rapport se rapprochera de l'unité et plus le réglage sera parfait, d'une part, et plus le rendement en énergie sera élevé, d'autre part.

Si on détermine ce rapport aux différents points de la décharge et de la charge, on le trouve variable et beaucoup plus faible au début et à la fin de ces opérations. C'est vers le tiers de chacune d'elles qu'on obtient la valeur la plus élevée ; c'est donc en ce point que l'élément aura le meilleur fonctionnement.

En étudiant d'autre part l'influence de l'intensité du courant, nous avons trouvé pour des périodes successives de charge et de décharge de trente secondes de durée : $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0,971$ pour la densité de courant 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente ; cette valeur baissait à 0,940 pour la densité de courant 1,25 , à 0,860 pour la densité de courant 3,0 et à 0,766 pour la densité de courant 5,0 ampères par décimètre carré. Comme, d'autre part, le rendement en quantité s'élève également et peut atteindre ici 0,97, on voit que le rendement en énergie est susceptible d'atteindre la valeur très élevée 0,97.0 , 971 = 0,94, valeur qui, évidemment, baisse avec l'intensité du courant et aussi avec la longueur des périodes successives de décharge et de charge. Elle dépend aussi de la concentration, les chiffres précédents se rapportant à la concentration 29° B. qui correspond sensiblement au minimum de résistivité de l'acide et est la position la plus avantageuse.

Le rendement en énergie dépend de la température. On a vu précédemment que le rendement en quantité diminue quand la température s'élève. Le rendement en énergie doit donc se ressentir de cette première influence ; mais, d'un autre, côté le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ se rapproche d'autant plus de l'unité que la température est élevée, ainsi

qu'il résulte des courbes données dans les *fig.* 17 et 18. Pour les températures 16°,5 et 41° C., nous avons trouvé dans les mêmes conditions de charge et de décharge $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0,895$ à 0,858, selon le régime, pour $t = 16°,5$ C., et $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0,932$ à 0,901 sous les mêmes conditions pour $t = 41°$ C.

Par suite de ces deux influences inverses, le rendement en énergie est relativement peu dépendant de la température ; cependant, quand celle-ci atteint une certaine valeur, le rendement en quantité baisse plus rapidement que n'augmente $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ et le rendement en énergie diminue.

Les causes de perte en énergie sont d'abord celles que nous avons signalées à propos du rendement en quantité. En outre, il y a la perte de chaleur due à la résistance intérieure et la perte d'énergie due aux variations de la force électromotrice en charge et en décharge. La perte due à la résistance intérieure est la plus importante des deux lorsqu'il s'agit de décharges et charges partielles successives effectuées à densité de courant assez élevée. Si on appelle c_1 la concentration moyenne correspondant à l'état de charge et c_2 celle moins élevée de décharge, la deuxième cause de perte correspond à la chaleur de dilution d'une quantité d'acide sulfurique égale à la quantité active (proportionnelle au nombre d'ampères-heures) passant de la concentration c_1 à la concentration c_2. Cette perte est la plus importante dans le cas de charges et décharges complètes à faible densité de courant.

Conclusions relatives à l'accumulateur au plomb. — Les qualités générales de l'accumulateur au plomb, telles qu'elles résultent de l'étude que nous venons de faire, permettent à cet appareil des applications très variées, depuis les éléments robustes employés à poste fixe jusqu'aux éléments légers utilisés en automobilisme.

On reproche à l'accumulateur au plomb d'être coûteux d'entretien. Quoiqu'il soit désirable, en effet, de pouvoir réduire ce coût d'entretien, il ne faut pas en exagérer l'importance. A l'heure actuelle, une batterie bien conduite, d'un prix d'achat de 0f,20 à 0f,30 par ampère-heure (au régime de dix heures) et par élément, ne donne lieu, comme entretien annuel, qu'à une dépense de 5 à 10 0/0 du prix d'achat. Il est certain que, dans ces conditions, la présence des batteries d'accu-

mulateurs dans les installations à courant continu est le plus souvent non seulement indispensable au point de vue du fonctionnement, mais encore économique, si on considère le prix de revient de l'énergie électrique.

D'un autre côté, on reproche à l'accumulateur au plomb d'être trop lourd dans les applications transportables. Certes il y a lieu de souhaiter très vivement des progrès dans ce sens. Mais il faut reconnaître qu'à ce point de vue l'accumulateur au plomb répond suffisamment bien aux besoins de l'électromobilisme urbain, qui est de toutes les applications celle qui exige la plus grande énergie spécifique.

Une voiture munie d'une batterie d'un poids de 30 à 35 0/0 du poids total parcourt facilement aujourd'hui 100 kilomètres à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure, sans recharge. Ce résultat n'est obtenu, il est vrai, qu'en sacrifiant sur la durée des plaques. Cependant il résulte des chiffres indiqués par une Compagnie que, sur 0f,462 dépense totale journalière par kilomètre-voiture, les frais d'entretien de batterie n'entrent que pour 0f,07. Il ne dépend donc pas uniquement de l'accumulateur que l'automobile électrique soit encore un article de luxe.

Examinons maintenant les conditions générales de fonctionnement des couples qui ont été proposés pour remplacer l'accumulateur au plomb.

Accumulateurs divers. — Parmi les accumulateurs autres que l'élément au plomb, on peut considérer une première classe d'éléments dans lesquels l'électrolyte est encore l'acide sulfurique. En remplaçant simplement dans l'accumulateur ordinaire le plomb par le zinc, on constitue un élément dont la réaction principale de fonctionnement :

$$Zn + 2H^2SO^4 + PbO^2 = ZnSO^4 + PbSO^4 + 2H^2O,$$

correspond à une force électromotrice de 2,3 à 2,4 volts et qui peut être suivie d'une deuxième réaction :

$$Zn + H^2SO^4 + PbSO^4 = ZnSO^4 + H^2SO^4 + Pb,$$

qui ne correspond qu'à une force électromotrice voisine de 0,5 volt et n'est par conséquent pas utilisable.

En outre de l'augmentation de la force électromotrice, l'accumu-

lateur au zinc donne sur celui au plomb l'avantage d'une plus grande capacité spécifique, car l'équivalent électrochimique du zinc est très inférieur à celui du plomb. Ainsi, tandis qu'il faut théoriquement 3gr,86 de plomb par ampère-heure, il suffit d'engager 1gr,21 de zinc pour produire la même quantité d'électricité. Si on joint à cela qu'il n'y a pas à tenir compte ici d'un coefficient d'utilisation, puisque le zinc engagé se dissout, on voit que, pour la même capacité, les cathodes en zinc pourront être de poids très inférieur à celui des cathodes en plomb. Les deux avantages ci-dessus se traduisent par une augmentation de l'énergie spécifique. Malheureusement l'élément a, à côté de cela, des inconvénients tels que toutes les tentatives faites pour rendre son emploi industriel ont jusqu'ici échoué. Le zinc, en effet, s'attaque à circuit ouvert et, malgré les procédés d'amalgamation employés, les actions locales restent importantes, et le rendement en quantité s'affaiblit. Un autre inconvénient très grave provient de la dissolution du métal actif pendant la décharge. La charge ramène celui-ci sur la cathode, sous forme de dépôt électrolytique. Or, on le sait, un bon dépôt exige des conditions qui sont en général incompatibles avec les nécessités des charges pratiques. Il se produit alors pendant la charge un dépôt irrégulier du métal, et, tandis qu'en certains points la couche peut être suffisamment épaisse pour venir toucher l'anode et provoquer ainsi des courts-circuits, en d'autres points elle est insuffisante. Il arrive même fatalement qu'une adhérence imparfaite provoque la chute de métal au fond du bac ; cette quantité de métal ainsi éliminé des réactions n'y entre plus que grâce à son attaque directe par l'électrolyte, d'où perte importante d'énergie.

Le remplacement du plomb à la cathode par le cadmium ou par le cuivre donne lieu aux mêmes observations que dans le cas du zinc ; mêmes avantages et mêmes inconvénients à des degrés variables. La force électromotrice est d'environ 2,3 volts avec le cadmium, elle n'est que de 1,2 à 1,3 volt avec le cuivre. On a essayé aussi comme cathodes l'antimoine, le bismuth, l'argent, etc., mais sans succès.

D'une façon générale dans cette classe d'accumulateurs, à égalité de rendement en ampères-heures, le rendement en énergie augmente avec la force électromotrice, par suite du rapprochement de l'unité du rapport $\frac{E_{moy}}{E'_{moy}}$.

Le remplacement de l'anode au peroxyde par une anode en acide antimonique, qui a été essayé par G. Darrieus, ne donne qu'une force électromotrice très faible (0,7 volt).

Le couple peroxyde de plomb, acide sulfurique, soude, zinc, donne une force électromotrice très élevée, 3,2 à 3,3 volts d'après H. Lake, mais offre comme inconvénients de nécessiter un vase poreux, d'avoir des actions locales très importantes et d'avoir la cathode soluble.

Dans une deuxième catégorie, on peut mentionner les accumulateurs à gaz. Malgré les résultats très intéressants obtenus notamment avec le palladium (Cailletet et Colardeau ont obtenu jusqu'à 176 ampères-heures par kilogramme de mousse de palladium à la pression de 600 atmosphères), la pile réversible à gaz n'est pas entrée dans le domaine industriel. Sa force électromotrice est faible, 1,2 à 1,3 volt ; la capacité spécifique, élevée quand on la rapporte au poids de mousse, diminue considérablement lorsqu'on la rapporte au poids total d'élément, récipients à gaz compris ; le rendement en énergie est très faible, 0,5 au maximum ; enfin les matières utilisées sont très coûteuses (le palladium vaut environ 10.000 fois plus cher que le plomb).

Dans une troisième catégorie, nous classerons les accumulateurs aux halogènes. Les piles réversibles au chlorure de zinc, bromure de zinc, chlorure de brome n'ont qu'une énergie spécifique inférieure à celle de l'accumulateur au plomb et des actions locales plus considérables. On obtient une énergie supérieure en employant la pression ; mais alors on se trouve en présence de grosses difficultés en ce qui concerne le récipient, dont le poids élevé vient d'ailleurs diminuer l'énergie spécifique. La pile réversible au chlorure de fer a une faible force électromotrice (un peu moins de 1 volt), une faible énergie spécifique, et nécessite la présence d'un vase poreux. L'élément zinc, chlorure d'argent, parmi tous ses inconvénients, présente celui d'un prix trop élevé pour qu'on puisse songer à son utilisation.

La classe la plus importante est actuellement celle des accumulateurs à électrolyte alcalin. Le premier type classique, le couple zinc, potasse, oxyde de cuivre, a paru présenter au début suffisamment de qualités pour justifier des tentatives d'application. Grâce aux faibles équivalents électrochimiques des substances employées, la capacité spécifique de cet élément est très supérieure à celle de l'élément au plomb ; malheureusement, la faible force électromotrice, 0,8 volt, rend l'énergie spécifique sensiblement égale à celle de l'accu-

mulateur au plomb. Les tentatives d'application n'ont pas été couronnées de succès par suite de l'attaque du zinc à circuit ouvert, de la solubilité de la cathode, et enfin par suite de la solubilité partielle de l'oxyde de cuivre qui s'électrolyse en charge et donne sur la cathode un dépôt de cuivre ; ce cuivre crée avec le zinc un couple parasite qui accélère l'attaque du zinc et rend très intenses les actions locales. Le rendement en énergie est inférieur à celui de l'accumulateur au plomb.

Le remplacement de l'oxyde de cuivre par l'oxyde de nickel a supprimé l'inconvénient de la solubilité partielle de l'anode. De plus, il a augmenté à 1,85 volt environ la valeur de la force électromotrice, le passage de Ni^2O^3 à l'état de NiO se faisant presque sans absorption ni dégagement de chaleur. Mais il reste toujours l'inconvénient de la cathode soluble et des actions locales énergiques.

Dans le groupe des accumulateurs à électrolyte alcalin, on peut placer les accumulateurs à électrolyte invariable, qui, jusqu'ici, n'ont été réalisés qu'avec un électrolyte alcalin. On appelle ainsi des piles réversibles dans lesquelles l'électrolyte ne participe pas aux réactions chimiques, l'anode et la cathode étant soumises simplement à des actions de réduction et d'oxydation à la décharge et à des actions inverses pendant la charge. On attribue ordinairement à E.-W. Jungner (brevet allemand 110210 du 31 mars 1899, brevet français 288713 du 10 mai 1899) la découverte de cette classe importante d'accumulateurs. Cependant, c'est G. Darrieus qui le premier en a revendiqué l'emploi et a montré les avantages de l'invariabilité de l'électrolyte. Dans son brevet français 233083 du 27 septembre 1893, non seulement cet auteur mentionne les électrodes insolubles, mais encore, parlant des réactions de charge et de décharge, il dit textuellement : « Tout se passe comme s'il y avait simple décomposition de l'eau et simple transport d'hydrogène ou d'oxygène d'un pôle à l'autre, etc. » C'est bien là la définition de l'invariabilité de l'électrolyte. Parmi les couples cités par G. Darrieus se trouvent le couple bismuth, soude ou potasse, oxyde de cuivre, le couple cadmium, potasse ou soude, oxyde de cuivre (antériorité incontestable au brevet Edison 305563 du 20 novembre 1900). Le fer et le nickel sont encore signalés, au même titre que le cadmium, le bismuth et le cuivre, parmi les corps les plus aptes à constituer des électrodes de cette nouvelle catégorie d'accumulateurs brevetée depuis par Jungner et par Edison soit au point de vue général, soit à quelques points de vue particu-

liers. Comme une étude même résumée de tous les couples de cette catégorie nous entraînerait trop loin, nous ne retiendrons que le couple fer, potasse, oxyde de nickel, qui a fait l'objet des brevets Edison (brevets français 307864 et anglais 2490, tous deux du 5 février 1901) et que Jungner avait également breveté (brevet suédois 15567 du 22 janvier 1901 et brevet français 314427 du 23 septembre 1901) en indiquant non le fer, mais son hydroxyde $Fe(OH)^2$, comme matière active de la cathode.

L'accumulateur fer-nickel est certainement, de tous les accumulateurs autres que l'élément en plomb, celui sur lequel les plus grandes espérances ont été fondées depuis 1901. Aussi l'étudierons-nous d'un peu près, comparativement à l'accumulateur actuel.

Au point de vue théorique, il n'y a pour ainsi dire rien de connu, et les travaux sur cette question manquent absolument. Si nous supposons que l'équation réversible de décharge est :

$$Fe + KOH + Ni^2O^3 \rightleftarrows FeO + KOH + 2NiO,$$

nous trouvons d'après les données thermochimiques un dégagement de chaleur de

$+$ 69 calories pour l'oxydation de Fe en FeO,
$-$ 0,6 — la réduction de Ni^2O^3 en 2NiO,

soit en tout 68,4 calories correspondant à $\frac{68,4}{2,23} = 1,48$ volt environ, valeur voisine de celle que l'on observe. C'est cependant une simple hypothèse, et il est possible notamment que le degré d'oxydation du nickel soit supérieur à Ni^2O^3 (NiO^2 par exemple) et que les oxydes engagés dans les réactions affectent la forme hydratée.

Edison admet que, pendant la décharge, il y a réduction de NiO^2 en Ni^2O^3; mais les données thermochimiques relatives à NiO^2 manquent, et il est impossible d'exprimer les chaleurs dégagées dans ce cas.

Sans vouloir entrer dans les détails de description, disons que les plaques, positives comme négatives, sont constituées à l'aide de cuvettes en tôle d'acier très mince et perforée qui renferment des briquettes de matière active et sont assemblées dans un cadre en tôle d'acier nickelée. Les briquettes sont obtenues par compression élevée de sesquioxyde de nickel mélangé à du graphite dans le cas de la positive, et de fer réduit (oxyde de fer chauffé dans un

courant d'hydrogène) et également mélangé soit à du graphite, soit à un autre corps conducteur, dans le cas de la négative.

L'allure de décharge d'un élément Edison est comparable à celle de l'élément au plomb, les valeurs de la différence de potentiel étant plus faibles. La *fig.* 20 montre cette allure, d'après les essais faits au Laboratoire central d'électricité. Lorsqu'on pousse la décharge, on trouve cependant un second palier dû à l'électrode négative qui se réduit sans doute à un degré d'oxydation inférieur. Les courbes I

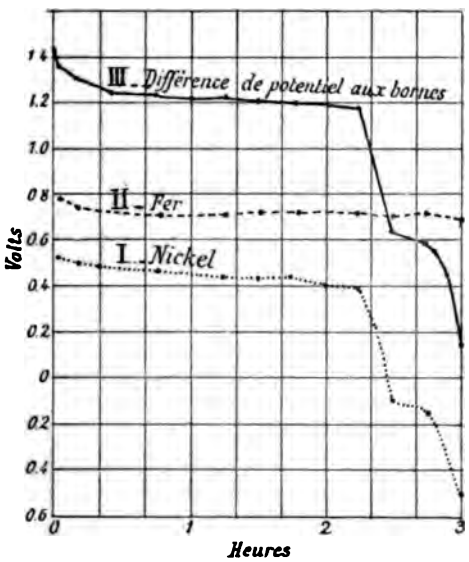

Fig. 20.

et II, qui se rapportent aux tensions anodique et cathodique en prenant une électrode auxiliaire nickel (on se servait ici du bac en acier nickelé), indiquent bien que le second palier est imputable à la positive et que c'est celle-ci qui limite la capacité. Dans les cas où on peut pousser la courbe de la négative, on trouve aussi quelquefois un second palier. Il est assez naturel que la capacité soit limitée par la positive ; en effet, si l'on admet avec Edison que les réactions de la décharge sont bien une oxydation de Fe en FeO et une réduction de Ni^2O en Ni^2O^3, il faut théoriquement 1gr,045 Fe par ampère-heure, tandis qu'il faut 3gr,383 NiO^2.

Si on détermine la variation de la tension moyenne aux bornes

en fonction de l'intensité de décharge, on trouve qu'elle baisse plus vite que dans le cas de l'élément au plomb. Le fait doit être probablement imputable à une résistance intérieure un peu plus grande. Cette résistance intérieure de l'élément Edison dépend surtout de la résistance des électrodes, puisque, pour une résistance de 0,000023 ohm pour l'électrolyte (potasse à 20 0/0), M. Janet a trouvé une résistance moyenne de 0,003 ohm pour l'élément. Entre la fin de charge et la fin de décharge, la résistance augmentait de 0,0025 à 0,0035 ohm.

Tous les essais faits sur l'accumulateur Edison montrent que, dans de grandes limites d'intensité de décharge, la capacité baisse peu.

C'est là un avantage incontestable sur l'accumulateur au plomb et qui tient certainement en grande partie à l'invariabilité de l'électrolyte, celui-ci n'entrant pas en réaction, comme il le fait dans l'accumulateur au plomb. Ainsi, entre la décharge en sept heures et celle en quarante-sept minutes, la capacité massique ne baisse que de 21,4 à 19,65 ampères-heures par kilogramme d'élément, et l'énergie massique de 27,75 à 20,04 watts-heures par kilogramme d'élément.

Si on compare au point de vue de l'énergie, on trouve qu'au régime de cinq heures (le plus courant dans l'application aux automobiles) l'élément Edison ne donne qu'une énergie massique égale à celle des meilleurs accumulateurs au plomb. Au régime de trois heures, l'énergie massique de l'élément Edison devient supérieure de 10 à 15 0/0.

En revanche, à égalité d'encombrement, l'accumulateur Edison donne une énergie de 20 0/0 environ inférieure à celle de l'accumulateur au plomb au régime de cinq heures et de 5 0/0 au moins au régime de trois heures.

La capacité de l'élément fer-nickel est dépendante de la température, ainsi que l'indiquent les courbes de la *fig.* 21, données par M. Janet. On en déduit qu'entre 0 et 50° C. la capacité augmente d'environ 0,54 0/0 par degré C. Cette variation est moins grande que dans le cas de l'accumulateur au plomb, pour lequel on trouve, au régime correspondant, un coefficient au moins double et quelquefois triple ou quadruple, selon le type de plaque. Cette différence est encore explicable par ce fait que, dans l'élément fer-nickel, l'électrolyte ne participe pas aux réactions chimiques.

Des expériences effectuées au Laboratoire central d'électricité il

résulte qu'après huit jours l'élément Edison essayé avait perdu 12 0/0 de sa capacité. Au point de vue des actions locales, cet élément ne serait donc pas supérieur à l'accumulateur au plomb (un bon élément peut ne perdre que 5 0/0 de sa capacité en huit jours).

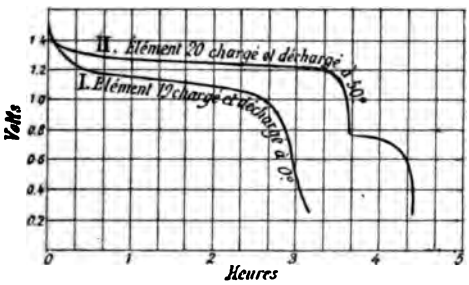

Fig. 21.

La comparaison au point de vue du rendement est tout à fait défavorable à l'élément fer-nickel, avec lequel on ne dépasse pas 0,50 pour le rendement en énergie. Cette faible valeur est due non seulement à ce que le rendement en quantité est plus faible que celui de l'élément au plomb, mais encore à ce que le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ est notablement plus faible; ce rapport est voisin de 0,7, tandis qu'il atteint facilement 0,8 dans le cas des décharges complètes avec l'élément au plomb. La différence tient en partie à la résistance intérieure plus grande du couple fer-nickel.

Au point de vue de la durée, si certains essais n'ont pas paru favorables à l'élément fer-nickel, d'autres, au contraire, et notamment ceux effectués au Laboratoire central d'électricité, ont montré que l'élément Edison a une durée supérieure à celle des accumulateurs au plomb légers actuellement employés pour les automobiles.

Pour résumer, on peut dire que l'élément fer-nickel présente un très réel intérêt. Il tient ses qualités de l'emploi de substances à faible équivalent électrochimique et de l'invariabilité de l'électrolyte. Celui-ci ne participant pas aux réactions, il n'y a pas à craindre d'en réduire la masse. Cela permet de réduire à la fois le poids et l'encombrement et de rendre la capacité de l'élément moins dépendante des principaux facteurs variables que celle de l'élément au plomb. Malheureusement on ne tire pas de ces avantages tout le bénéfice

qu'on serait en droit d'en attendre, par suite du faible coefficient d'utilisation de la matière et de sa résistance relativement élevée, ce qui nécessite l'addition de matières conductrices inactives augmentant le poids et l'encombrement.

Au point de vue pratique, l'élément fer-nickel, dans son état actuel, ne peut guère être utilisé que dans des cas exceptionnels, à cause de son mauvais rendement et de son prix élevé (2 à 3 fois le prix de l'élément au plomb à égalité d'énergie), qui l'éliminent complètement de toutes applications à poste fixe. Dans les éléments légers transportables, il ne peut devenir avantageux au point de vue de l'énergie spécifique que dans le cas de décharges et charges très rapides (cas des tramways à charge rapide par exemple); mais là encore il ne peut être économique que dans des cas spéciaux, à cause des frais élevés d'intérêt et d'amortissement auxquels il donne lieu et des dépenses de courant que son mauvais rendement nécessite.

Mais il faut bien remarquer que l'élément fer-nickel est tout jeune et qu'il a fallu bien des années pour faire de l'élément au plomb l'indispensable auxiliaire de l'industrie électrique que nous connaissons aujourd'hui.

Considérations générales relatives à la possibilité d'obtenir un couple réversible supérieur à l'accumulateur au plomb. — De l'étude que nous venons de faire, il résulte que, si certains éléments présentent sur quelques points une supériorité sur l'accumulateur au plomb, celle-ci est rachetée par des inconvénients beaucoup plus importants sur d'autres points.

Il serait par trop pessimiste d'en conclure qu'il est impossible de trouver une pile réversible supérieure à l'élément au plomb; mais il faut bien dire que la multiplicité des conditions à réunir rend la solution très difficile. Examinons ces conditions générales.

Pour réaliser un accumulateur à énergie spécifique élevée, il faut une force électromotrice et une capacité aussi grandes que possible.

On obtiendra une force électromotrice élevée en choisissant des substances capables de dégager de grandes quantités de chaleur pendant les réactions chimiques qui s'accomplissent en décharge.

A l'électrode négative on doit faire choix d'un métal ayant une tension de dissolution aussi élevée que possible. Malheureusement, on est rapidement arrêté dans cette voie ascendante par l'attaque chimique directe du métal par l'électrolyte. Cette attaque étant déjà très importante avec le zinc, dans le cas d'emploi d'électrolytes

acides ou basiques, on ne peut songer à employer les métaux alcalins ou alcalino-terreux, qui sont attaqués directement par l'eau. Et c'est grand dommage, car ces métaux permettraient des forces électromotrices très élevées. De ce côté, la seule chance de salut serait la découverte d'un dissolvant autre que l'eau, capable d'un pouvoir de dissociation suffisant et attaquant moins facilement les alcalins ou alcalino-terreux. Aucune recherche ne paraît avoir été tentée dans cette voie ; les chances de réussite sont d'ailleurs bien faibles, car le dissolvant doit, en outre, être simple et ne pas changer de composition pendant l'électrolyse.

Sauf dans le cas d'emploi de sels haloïdes, l'halogène se recombinant directement avec le métal pendant la décharge, on emploie à l'électrode positive un corps plus ou moins oxydé qui, pendant la décharge, se réduit plus ou moins. Cette réduction se fait tantôt avec dégagement, tantôt avec absorption de chaleur ; ce dernier cas est malheureusement le plus général. En vue d'obtenir une force électromotrice élevée, il importe de choisir comme dépolarisant à l'électrode positive une substance dont les réactions de décharge donnent lieu à un dégagement de chaleur. C'est ce qui a été réalisé d'une façon presque unique jusqu'à ce jour par le peroxyde de plomb dans l'acide sulfurique.

Le nombre des combinaisons à proposer est très restreint, par suite de la condition d'insolubilité de la matière positive dans tous ses états, si on veut éviter le dépôt, sur la négative, du métal qui entre dans la composition du dépolarisant, fait qui occasionne, comme on a vu, des actions locales énergiques et une destruction de l'anode. On doit même imposer comme condition l'insolubilité de la matière active négative dans tous ses états, si on veut un accumulateur réellement industriel et exempt des inconvénients inhérents au dépôt électrolytique opéré pendant la charge, inconvénients que nous avons déjà signalés et dont les principaux sont l'irrégularité du dépôt et souvent son manque d'adhérence dans les conditions ordinaires d'emploi de l'accumulateur.

La capacité que peut donner une matière active dépend de son équivalent électrochimique et du nombre de valences engagées. C'est ainsi que l'oxyde de cuivre CuO passant à l'état de cuivre métallique donne une capacité double du sous-oxyde Cu^2O passant également à l'état de cuivre métallique. Un autre exemple est donné par le peroxyde de plomb, qui, passant à l'état de plomb métallique,

comme cela est possible en employant une cathode en zinc, donne une capacité double de celle qui correspond à la réduction simple du peroxyde en sulfate de plomb, comme cela a lieu avec la cathode en plomb spongieux. Bien entendu, à chacune des valences engagées, la force électromotrice peut varier (c'est le cas du couple peroxyde de plomb-zinc), si les chaleurs de réaction varient également. Plus faible sera l'équivalent électrochimique et plus grande sera la capacité spécifique. Le plomb ayant un équivalent électrochimique élevé, il n'est pas difficile de trouver de métaux supérieurs à lui à ce point de vue.

En pratique, il y a lieu de tenir compte, en outre, d'un certain coefficient d'utilisation, les substances actives insolubles ne pouvant être, en général, engagées complètement dans les réactions pendant la décharge. Pour l'accumulateur au plomb, par exemple, on a vu qu'il est difficile d'utiliser plus de la moitié de la matière active. Le coefficient d'utilisation, variable avec les différentes substances, dépend, pour chacune d'elles, de l'état physique, de la porosité, de la conductibilité. Ce coefficient d'utilisation se rapproche d'autant plus de l'unité que les substances actives et aussi leurs produits de transformation en décharge sont conducteurs et que la porosité tend à augmenter pendant la décharge, ce qui a lieu avec l'emploi, comme substances anodiques, d'oxydes ou de sels métalliques (Cu^2O, AgCl, $PbCl^2$, etc.), qui se réduisent à l'état métallique pendant la décharge. C'est le contraire qui arrive dans l'accumulateur au plomb, où la matière active se sulfate et diminue de porosité ainsi que de conductibilité.

Si on aborde le côté économique, on constate d'abord que le choix des matières susceptibles d'être employées est limité par le prix de ces matières. Le nickel a déjà une valeur élevée (450 francs les 100 kilogrammes); dans l'ordre décroissant des prix viennent les métaux usuels suivants : l'aluminium, l'étain, le cuivre, l'antimoine, le zinc, le plomb, le fer.

Un autre point dont l'importance n'est pas à démontrer est la durée des plaques. Les effets actuellement connus des actions électrolytiques permettent d'affirmer que toutes les plaques d'accumulateurs doivent avoir fatalement une durée limitée. Même en admettant une insolubilité suffisante des matières actives, ce n'est pas impunément que l'on soumet celles-ci à des charges et décharges successives, qui changent à tout instant leur état physique comme leur composition chimique. C'est là la source de dégradation de la

plaque, ou même simplement, si la matière active ne tombe pas, de la variation de capacité de cette plaque.

En outre, l'action électrolytique s'exerçant sur les supports attaque ceux-ci plus ou moins rapidement. Il est permis de supposer qu'il peut exister des plaques à plus grande durée que celles de l'accumulateur au plomb. Cependant aucune jusqu'à ce jour n'a pu réunir cette qualité avec les différentes autres que nous avons examinées et qui sont indispensables.

Au point de vue économique intervient aussi le rendement de l'accumulateur. Nous avons vu qu'à ce propos l'accumulateur au plomb est certainement un des mieux placés. Dans les accumulateurs à faible force électromotrice, la surélévation de celle-ci à la fin de la charge, par suite de la séparation des ions de l'électrolyte, est en général relativement plus importante que lorsque la force électromotrice est plus grande. C'est ainsi qu'on obtient pour l'accumulateur cuivre, acide sulfurique, peroxyde de plomb, par exemple, un rendement en énergie (pour un même rendement en quantité) moindre qu'avec l'accumulateur au plomb.

Le meilleur accumulateur à ce point de vue serait un élément à électrolyte invariable, à faible résistance intérieure, sans actions locales, et dont la force électromotrice serait aussi voisine que possible de la tension nécessitée par la séparation des ions de l'électrolyte. Les éléments aux sels haloïdes de zinc sont en très bonne posture à cet égard, car ils ne présentent pas de surélévation de tension à la fin de la charge, si on n'épuise pas complètement l'électrolyte.

Ces quelques considérations suffisent à montrer les difficultés du problème.

Il faut souhaiter que celles-ci puissent être rapidement résolues, soit par des perfectionnements encore possibles de l'accumulateur au plomb, soit par la mise au point d'un élément de la classe si intéressante des accumulateurs à électrolyte invariable, soit par toute autre voie.

C'est sur ce vœu que je terminerai en vous remerciant, Messieurs, de la bienveillante attention que vous avez bien voulu me prêter.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DANS LA CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS (¹) ;

Par M. Boucherot,
Ingénieur-conseil.

Messieurs,

J'ai la bonne fortune d'avoir été soulagé d'une partie de ma tâche par M. Janet, qui, dans le langage clair et précis dont il est coutumier, vous a, parmi d'autres choses d'égal intérêt, mis au courant de l'évolution morphologique des alternateurs et des principales préoccupations des ingénieurs électriciens à l'égard de ces machines.

Néanmoins, il me reste beaucoup de choses à dire, j'ajouterai même que je suis plutôt embarrassé par le choix à faire parmi tout ce qui pourrait être signalé.

On a dit souvent que ce qui caractérise le plus l'industrie électrique, c'est l'énorme rapidité de son évolution. Cela ne s'est pas fait toujours sans douleurs : en particulier le développement des courants alternatifs a rencontré au début, en France, des résistances opiniâtres. Sauf quelques rares constructeurs, parmi lesquels je suis heureux de pouvoir citer notre précédent conférencier, M. Hillairet, et sauf quelques ingénieurs qui criaient comme des sourds sans qu'on les entende, tout le monde, des hommes considérables comme les plus humbles monteurs électriciens, tout le monde faisait bloc contre les courants alternatifs.

Je crois que cela est dû surtout à ce que c'est en France, sous la forme « continu », que l'électricité a commencé réellement cette belle évolution industrielle.

Quoi qu'il en soit, aussi bien pour les courants alternatifs, depuis qu'ils ont pris place au soleil, que pour le courant continu, chacun peut faire cette constatation qu'il y a, parallèlement à ce développement rapide des applications, une énorme production littéraire. La littérature électrique est encombrée d'une multitude d'inventions qui n'ont jamais eu et n'auront jamais d'applications, de conceptions d'appareils n'ayant jamais pris une place quelconque dans l'industrie, et même de théories qui, non seulement ne sont employées par

(¹) Conférence faite le 30 mai 1905.

personne, mais sont souvent en désaccord avec les faits. Mêlées à tout cela, il y a encore beaucoup de bonnes choses. Je ferai mon possible pour ne choisir que parmi elles.

Je dois d'abord résumer ce que tout le monde sait plus ou moins.

Un alternateur se compose d'un inducteur et d'un induit pouvant être, l'un ou l'autre, fixe ou mobile, intérieur ou extérieur. L'inducteur est presque toujours mobile, et il est plus souvent à l'intérieur de l'induit qu'à l'extérieur, mais ce n'est pas une règle absolue.

Voici une machine, par exemple (*Projection*), dans laquelle on peut croire, à première vue, que c'est l'induit qui est mobile, parce qu'il paraît calé sur l'axe de la machine à vapeur ; cependant il est fixe, et c'est l'inducteur extérieur qui est mobile. Il y a relativement peu de ces machines, mais il y en a assez pour que l'on puisse en faire état [1].

Ceci posé, deux catégories d'alternateurs : ceux dans lesquels le flux passant dans une bobine induite change de sens : ce sont les alternateurs dits hétéropolaires ou à pôles alternés, et ceux dans lesquels le flux passant dans une bobine induite varie seulement d'une certaine valeur à une autre valeur voisine de zéro : ce sont les alternateurs homopolaires ou à flux ondulé (*Projection*).

Je n'ai que ce cliché montrant les détails d'une machine à flux ondulé. Comme je n'aurai plus l'occasion d'en parler ultérieurement, je vais en donner pour mémoire quelques explications. Dans ces machines, il y a deux induits, l'un qui se trouve ici, en avant, et l'autre masqué par derrière. A l'intérieur de ces induits tourne une sorte de poulie munie de proéminences, le tout en fer, qui constitue l'inducteur, ou *fer tournant;* entre les induits, une bobine magnétisante unique et fixe, que l'on ne voit pas ici, et qui se trouve dans l'axe de la machine. Cette bobine produit de chaque côté du fer tournant une série de pôles de même nom. Le flux, dans une bobine, par exemple celle qui se trouve ici, passe simplement de zéro à un minimum, sans se renverser.

Ce genre de machines tend de plus en plus à disparaître, malgré des avantages sérieux : en particulier, la présence d'une bobine magnétisante unique et fixe, l'absence d'enroulements mobiles, et conséquemment l'absence de bagues et frotteurs ; il en résultait une grande simplicité et une conduite facile.

---

[1] La machine représentée en *fig.* 19 est aussi de ce genre.

Malheureusement ces machines sont très lourdes pour une puissance déterminée; c'est pour cette raison qu'on les abandonne.

Tout ce qui va suivre maintenant concernera donc plus spécialement les alternateurs à pôles alternés. Par une série de projections, je vais vous faire assister à la réalisation d'une telle machine (*Projections*).

L'inducteur se compose des pôles proprement dits, des bobines magnétisantes placées sur ces pôles et d'une culasse servant au passage du flux d'un pôle à l'autre. Les pôles sont pleins ou feuilletés, suivant les circonstances; ou encore pleins avec épanouissements feuilletés.

En tous cas ils sont toujours réalisés avec des métaux très perméables. Ces pôles, étant enveloppés d'une bobine magnétisante, doivent, pour un même flux, avoir un périmètre aussi réduit que possible; on a donc intérêt à employer des matériaux de très haute perméabilité. Il n'en est pas de même pour la culasse, qui peut être de fonte ou d'acier. Lorsqu'elle est en fonte, il faut y encastrer les pôles pour éviter certains effets secondaires.

Les bobines magnétisantes peuvent être, suivant les circonstances, réalisées avec des barres ou des fils de cuivre. Dans cette machine (*Projection*), les bobines sont faites de barres de cuivre posées sur champ. Ces barres de cuivre donnent à la machine un bel aspect, mais il n'est pas toujours possible de réaliser l'enroulement de cette manière, parce que la section de la barre ne peut pas descendre au-dessous d'une certaine valeur.

L'induit est composé de tôles assez fines pour que la perte par les courants de Foucault soit faible à la fréquence normale de la machine. On adopte généralement des tôles de 3 ou 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur. Ces tôles sont isolées entre elles par du papier ou du vernis.

Lorsqu'elles sont de petites dimensions : 1 mètre, $1^m,10$ de diamètre, elles peuvent être d'une seule pièce. Quand le diamètre dépasse $1^m,10$, les anneaux sont formés par la réunion de segments chevauchés et boulonnés ensemble (*Projection*). Cette photographie représente le support d'induit d'une machine montée sur le tour pour le travail. Quelques segments de tôles y sont disposés pour examiner comment les pièces se présentent. Vous voyez ici un segment, qui va depuis ici jusque-là; le second segment commence ici, va jusque-là, et ainsi de suite.

Ces segments sont percés de deux séries de trous; les trous d'enroulement, que voici, et les trous d'assemblage, qui sont ici, ces trous ronds. Lorsqu'on a placé une première couche de tôles, comme celle que vous voyez, on dispose la seconde de manière que ses segments chevauchent sur ceux de la première et ainsi de suite. L'induit est ainsi réalisé, sans solution de continuité, de sorte que l'ensemble boulonné forme une chaîne fermée d'une grande rigidité (*Projection*).

Voici une machine du même genre, mais plus grande; le montage des tôles est terminé. On voit ici les boulons d'assemblage de ces tôles. Évidemment, on réserve dans l'épaisseur des paquets de tôles des cheminées de ventilation, en nombre plus ou moins grand, suivant l'épaisseur de l'induit. Ici, l'induit ayant une vingtaine de centimètres de profondeur, il y a seulement une cheminée de ventilation.

Les trous d'enroulement ou encoches, que vous voyez assez mal ici, sont tantôt de forme circulaire ou elliptique, tantôt droits. Dans le premier cas, on dit que la denture est épanouie; dans le second, la denture est droite (*Projection*).

Voici un autre induit dans lequel vous pouvez voir encore l'assemblage des tôles. Voici les trous d'enroulement; ils sont de forme elliptique (plus exactement un rectangle terminé par deux portions de cercle). La denture droite a cet avantage que l'on peut entrer les bobines d'enroulement toutes faites dans le paquet de tôles, tandis qu'avec la denture épanouie il faut passer les fils, un à un, dans les entailles, ce qui est une difficulté pour le constructeur. Mais, d'autre part, la denture épanouie présente des avantages sur l'autre au point de vue des qualités intrinsèques de la machine.

Les conducteurs servant à l'enroulement sont des fils jusqu'à 4 ou 5 millimètres de diamètre au plus. Au delà, les fils seraient trop durs pour que l'on puisse les faire passer dans les encoches. On adopte alors ou bien le câble, constitué par un ensemble de fils fins, ou la barre pleine (*Projection*).

Voici d'abord un induit enroulé avec du câble. C'est du câble d'une centaine de millimètres carrés de section, relativement flexible, et facile à faire passer par les encoches (*Projection*).

Ici, au contraire, vous avez affaire à un induit formé de barres pleines. Vous voyez qu'une spire est alors formée de deux conducteurs; chaque conducteur est en forme d'L ou de Z et est plié une ou deux fois; il y a deux couches de conducteurs. On fait alors des

de l'induit viennent à se déplacer d'une quantité très petite l'un par rapport à l'autre, l'attraction augmente d'un côté, diminue de l'autre, et ce déplacement produit une différence entre les attractions des deux côtés, qui peut atteindre facilement 9 ou 10.000 kilogrammes pour 1 millimètre, c'est-à-dire le poids des pièces elles-mêmes.

En fait, il arrive qu'avec des décentrements importants, dans les grandes machines, le poids des pièces ne compte plus ; la partie tournante libérée des paliers se trouve soulevée comme une plume par la différence des efforts magnétiques. Si, sous l'influence de cette différence, pour un faible décentrement, les pièces fléchissaient d'une façon appréciable, le décentrement s'accentuerait jusqu'au contact entre l'inducteur et l'induit, contact qui produirait des accidents très graves, vous n'en doutez pas.

Pour éviter cela, on est donc amené à donner aux matériaux de soutènement que vous voyez ici des dimensions et un poids considérables relativement, ce qui se paye.

Cela se paye d'autant plus cher que le diamètre est plus grand, parce que l'épaisseur de ces pièces doit croître avec le diamètre, en sorte que le poids augmente bien plus que le diamètre.

C'est pourquoi les dimensions des machines ne sont pas déterminées par des considérations aussi simples qu'on pourrait croire au premier abord.

Dans les débuts, on ne se préoccupait pas de la forme de la courbe de tension des alternateurs. Il y avait bien la méthode de M. Joubert qui permettait de relever cette courbe avec soin; mais, comme il fallait, pour l'appliquer, faire une installation spéciale, et que, d'autre part, on ne connaissait pas les inconvénients des harmoniques, on se contentait de les ignorer. On avait ainsi parfois des courbes très fantaisistes. Les harmoniques se chargèrent de nous faire penser à eux.

Leurs inconvénients sont de plusieurs sortes. Les harmoniques donnent lieu, d'abord, à des courants de circulation entre l'alternateur et les appareils d'utilisation ou, simplement, à des courants de capacité dans les câbles, qui augmentent les pertes par effet Joule dans les circuits en activité. Mais c'est là peu de chose en comparaison des surtensions qu'ils peuvent provoquer. Vous savez que, lorsque la fréquence propre d'oscillation d'un circuit contenant une self-induction et une capacité est égale à la fréquence de la force

électromotrice qu'on lui applique, le courant passe dans ce circuit comme s'il n'y avait que la résistance, sans capacité ni self-induction, et que la tension aux bornes de la self-induction ou de la capacité peut se trouver considérablement plus grande que la tension appliquée.

Ici la self-induction, c'est celle de l'alternateur; la capacité, c'est celle de la ligne; elle devient assez importante quand elle est de longueur moyenne et à câbles concentriques, ou quand elle est aérienne et très longue.

La capacité n'a jamais été, jusqu'ici, assez grande pour faire résonner la fréquence fondamentale, mais elle l'a été assez souvent pour faire résonner l'un des harmoniques, tel que le septième, le neuvième, le onzième ou le treizième. Fort heureusement, lorsque ce fait se produit, la résistance du circuit, pour le courant de cette fréquence, est beaucoup plus grande que pour la fréquence fondamentale, en sorte que la tension aux bornes de la capacité ou de la self-induction n'atteint pas une valeur aussi grande que celle à laquelle on pourrait s'attendre *a priori*. Cela tient surtout à ce que nos circuits de machines sont enroulés sur du fer, et que ce fer, bien que feuilleté, est le siège de courants de Foucault qui deviennent très importants aux hautes fréquences et réagissent sur les circuits en introduisant des forces contre-électromotrices, comme feraient des résistances.

Je n'ai pas le temps de m'étendre sur ce sujet; mais, quoi qu'il en soit, nous avons intérêt à produire des forces électro-motrices sans harmoniques autant que possible.

Les harmoniques peuvent avoir deux origines différentes. Ils peuvent provenir, d'abord, de la forme des pôles, de leur étendue relativement au pas polaire, et des dimensions relatives des pôles et des bobines de l'induit; les grandeurs relatives de ces différents éléments interviennent pour modifier la forme de la courbe de la force électromotrice.

La seconde origine des harmoniques est dans la denture des induits.

Les harmoniques sont ordinairement de fréquence assez basse, quand ils viennent de la forme des pôles. Les alternateurs homopolaires, dont je vous ai montré un spécimen au début de cette conférence, ont cette propriété que, dans certains cas, ils peuvent donner des termes pairs de la série de Fourier; mais, en général, avec des

bobines induites convenables, il n'y a que des termes impairs provenant de la forme des pôles. Le troisième est le plus dangereux. Il disparaît avec des proportions convenables. Il est bon d'ailleurs de noter que les deux couplages que l'on peut faire en triphasé, le couplage en étoile et le couplage en triangle, ont pour effet de détruire les harmoniques multiples de 3 : 3, 6, 9, etc... En résumé, ces harmoniques sont faciles à éviter.

Il n'en est pas toujours de même de ceux de denture. Les harmoniques de denture viennent de ce que la résistance magnétique change par le passage des dents devant les pôles. Il n'y a pas constamment le même nombre de dents servant au passage du flux lors de sa pénétration dans l'induit, d'où une variation de flux rapide dans la bobine induite et production d'harmoniques. Si n est le nombre de trous, ou de dents, par paire de pôles, il y a production d'un harmonique de rang n, mais d'amplitude variable pendant la période, c'est-à-dire de la forme $\sin \omega t \sin n\omega t$, qui est équivalent analytiquement à deux harmoniques de rang $(n + 1)$ et $(n - 1)$ en vertu de l'égalité :

$$\sin \omega t \sin n\,\omega t = \frac{1}{2} \cos (n - 1)\,\omega t - \frac{1}{2} \cos (n + 1)\,\omega t.$$

Pour éviter ou réduire au moins ces harmoniques de denture, on peut employer plusieurs artifices. On arrondit les épanouissements polaires de façon que l'entrée sous le pôle soit plus douce et que la variation de flux qui en résulte soit moins forte. D'autres fois, on incline le bord du pôle par rapport aux encoches, ce qui produit un résultat analogue. D'autres fois encore, on incline les encoches, le bord du pôle restant parallèle à l'axe de rotation.

Ces moyens sont insuffisants quand l'entrefer n'est pas grand et quand la denture est saturée. Je crois d'ailleurs qu'aucun moyen n'est parfait dans ce cas ; celui consistant à placer sur l'inducteur une cage d'écureuil plus ou moins résistante ne peut avoir qu'une efficacité également incomplète, pour cette raison qu'autour des conducteurs de l'induit existe toujours un certain flux de dispersion. Quoi qu'on fasse, on ne peut pas obtenir que le flux de dispersion n'existe pas. Par conséquent il restera toujours quelque chose des harmoniques, des harmoniques de denture en particulier, et de ceux ayant une autre provenance également.

Ce quelque chose, d'ailleurs, n'est pas très important. On peut,

même avec des dents droites, qui donnent naissance aux plus forts harmoniques, et les artifices ordinaires, avoir pour ceux-ci une amplitude ne dépassant pas 3 ou 4 0/0 du terme fondamental. Il y a loin de ce résultat à ceux que l'on constate dans certaines machines, déjà anciennes d'ailleurs, et dont les harmoniques valent 20 ou 30 centièmes du terme fondamental. On peut se contenter de cela, et les courants de Foucault se chargent du reste.

Je ne terminerai pas cette partie sans dire combien les appareils permettant de relever rapidement les courbes des forces électromotrices, tels que l'oscillographe Blondel, le rhéographe Abraham, l'ondographe Hospitalier, ont été utiles aux électriciens pour ces études.

De même qu'une pile non polarisable est suffisamment définie par sa force électromotrice et l'intensité qu'elle donne en court-circuit, de même un alternateur est suffisamment défini en première approximation, quand on connaît avec sa fréquence sa force électromotrice efficace et l'intensité efficace qu'il débite en court-circuit.

Par là nous entendons la force électromotrice et l'intensité dans un des circuits de l'induit, les autres étant supposés placés dans les mêmes conditions ; il est inutile de compliquer les choses en considérant chaque fois tous les circuits de l'induit.

Alors que, dans la pile, le courant de court-circuit est limité par la résistance intérieure, ici c'est presque seule la self-induction qui le limite.

Mais, lorsqu'on achète un alternateur, ce n'est pas pour le mettre en court-circuit. Aussi demande-t-on qu'il soit capable de fournir une certaine tension et un certain courant décalés l'un par rapport à l'autre d'un angle φ défini par son cosinus. Cette valeur de l'angle φ n'est pas indifférente. Je vous demande d'ouvrir ici une parenthèse pour ceux qui ne sont pas très au courant de la technique des courants alternatifs.

Généralement un appareil récepteur quelconque absorbe un courant $i \sin(\omega t - \varphi)$ décalé, en retard, d'un angle φ sur la différence de potentiel aux bornes $e \sin \omega t$, que cet appareil soit un moteur, une lampe, une ligne même.

Pour la commodité du langage, on a l'habitude de décomposer ce courant en deux autres en vertu de l'égalité :

$$i \sin(\omega t - \varphi) = [i \cos \varphi] \sin \omega t - [i \sin \varphi] \cos \omega t.$$

La première composante de ce courant, $i \cos \varphi$, qui est en phase avec la différence de potentiel, s'appelle courant watté ; la seconde, composante $i \sin \varphi$, qui est en quadrature, en retard de 90°, s'appelle courant déwatté ou magnétisant.

En multipliant chacun de ces courants par la différence de potentiel, on obtient parallèlement la puissance réelle et la puissance magnétisante. En y regardant de près, on constate que la puissance réelle se retrouve toujours sous forme de puissance mécanique, chaleur, ou nouvelle puissance réelle, et que la puissance magnétisante sert, en réalité, à la magnétisation de l'appareil, ou, si elle ne sert pas entièrement à la magnétisation de l'appareil, se retrouve sous forme de nouvelle puissance magnétisante.

On démontre aisément que, de même que pour la puissance réelle, il y a, dans un réseau, conservation de la puissance magnétisante, c'est-à-dire que l'alternateur doit produire la somme des puissances magnétisantes absorbées par tous les appareils du réseau : lampes, moteurs, lignes, etc. Cette puissance magnétisante que l'alternateur doit produire est évidemment, pour lui, *démagnétisante ;* plus $\sin \varphi$ est grand ou $\cos \varphi$ petit, plus l'alternateur se trouve démagnétisé par le courant qu'il débite, à égalité d'*intensité*.

Cela se voit très bien, physiquement, de la façon suivante : dans un appareil d'induction quelconque, la force électromotrice est la dérivée changée de signe du flux par rapport au temps. Si le flux est sinus, par exemple, la force électromotrice est — cosinus ; elle est en retard d'un quart de période sur le flux. Si le courant issu de cette force électromotrice est lui-même en retard d'un quart de période sur elle, il est en retard d'une demi-période sur le flux, c'est-à-dire qu'il est en opposition avec lui, donc *démagnétisant*. Le courant déwatté, en retard, est démagnétisant pour l'appareil qui le débite. Au contraire, si le courant débité est en avance sur la force électromotrice d'un quart de période, il est en phase avec le flux, donc *surmagnétisant;* il tend à augmenter le flux dans l'appareil. C'est ce qui arrive si l'alternateur débite sur une capacité.

On peut, en effet, réaliser des alternateurs dans lesquels le champ soit entièrement produit par les courants débités dans des condensateurs. J'ai eu le plaisir de montrer une telle machine (*Projection, fig.* 2) à quelques-uns d'entre vous, il y a une dizaine d'années, lorsque la Société de Physique est venue visiter les Établissements Weyher et Richemond. Cette machine produisait des courants alter-

natifs entièrement en l'absence de courants continus, rien que par les courants qu'elle débitait elle-même dans la capacité que voici. Comme vous pouvez en juger, la caisse de condensateurs était très importante par rapport à l'alternateur; c'est pour cela que cette machine n'est pas devenue industrielle. Simple question de prix.

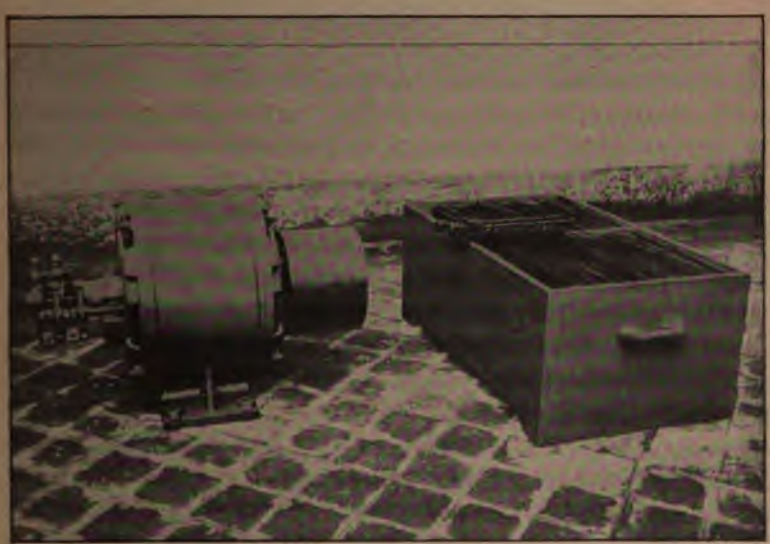

Fig. 2. — Alternateur excité par condensateurs.

Mais cette machine n'était pas un joujou; elle a donné pendant trois jours 18 kilowatts sous une tension de 1.000 volts. On pourrait donc, n'était le prix, faire des machines de ce genre. On pourrait même, chose curieuse, réaliser ainsi les mêmes modes d'excitation qu'avec le courant continu : shunt, série, compound. Mais il n'y en a pas d'application pratique. Et, si je vous en ai parlé, c'est uniquement pour vous montrer l'importance considérable du décalage des courants produits par la machine.

On pourrait donc définir commercialement un alternateur par sa tension, son courant et son cos φ. Mais vous allez voir que cela ne suffit pas et qu'il faut y joindre, soit son courant en court-circuit avec l'excitation donnant la tension normale à vide, soit sa chute de tension, lorsque, étant excité à vide, on lui fait produire son plein courant avec le cos φ spécifié.

Prenons deux alternateurs identiques en nous réservant seulement de faire différer les quantités de cuivre sur les induits et les entrefers. Seules, les excitations en charge devront être les mêmes, si l'on veut que les échauffements des inducteurs soient les mêmes. La machine à petit entrefer exigera à vide une plus faible excitation que l'autre. A égalité de débit et de cos φ, l'excitation de la machine à faible entrefer restera toujours plus faible que l'autre, en sorte que, pour arriver à l'égalité des excitations dans les deux machines, il faudra charger plus la machine au petit entrefer que l'autre. Pour que l'échauffement de l'induit n'en soit pas plus grand, il suffira d'y mettre un peu plus de cuivre.

Moyennant une faible dépense supplémentaire, une machine à petit entrefer peut donc être vendue pour une plus grande puissance, si l'on ne spécifie pas autre chose que la puissance, le cos φ et l'échauffement.

Mais excitons nos deux alternateurs pour qu'ils donnent la tension normale à vide et mettons-les en court-circuit ; l'alternateur à faible entrefer donnera un courant de court-circuit plus faible que l'autre. Bien plus, si nous considérons le rapport k entre le courant en court-circuit et le courant normal de la machine, ce rapport sera encore plus petit pour la machine à faible entrefer, puisque, d'une part, son courant de court-circuit est plus petit, et que, d'autre part, son courant normal est plus grand.

De là, donc, un premier moyen pour différencier deux machines qui, en apparence, peuvent faire la même production : déterminer le rapport k entre le courant de court-circuit et le courant normal. Les machines dans lesquelles le rapport k est petit (1 ou 1 1/2) sont dites à grande réaction. Les machines dans lesquelles le rapport k est grand (4 ou 5) sont dites à faible réaction.

Sans aller jusqu'à mettre en court-circuit les deux machines que nous avons comparées tout à l'heure, on peut, étant excitées à vide, leur faire débiter leur plein courant, sans changer l'excitation : la machine à faible entrefer aura une chute de tension plus grande que l'autre. De là un autre moyen plus souvent employé pour différencier deux machines capables de la même production : déterminer la chute de tension.

Dans les applications électrochimiques, on recherche les fortes chutes de tension, parce que des courts-circuits se produisant fréquemment dans les fours, et pouvant durer parfois un temps appré-

ciable, il ne faut pas qu'il en résulte de détérioration de la machine. Je dois vous dire en effet que, dans l'essai en court-circuit d'une machine à faible réaction, on s'arrange pour ne pas dépasser une fois et demie ou deux fois le courant normal, pour ne rien détériorer, et l'on extrapole, ayant affaire à une fonction franchement linéaire.

Dans les distributions mixtes, d'éclairage et de force motrice, on a intérêt au contraire à avoir des alternateurs à faible chute de tension, de façon que le démarrage ou la surcharge d'un moteur n'influent pas sensiblement sur la tension que reçoivent les lampes; autrement les lampes varient d'éclat, et leur durée se trouve très réduite par les variations de voltage.

Il y a une autre circonstance qui contribue à la chute de tension avec la charge et dont on ne s'occupe pas assez souvent, c'est la diminution de vitesse qui accompagne l'augmentation de charge : la vitesse diminuant, la force électromotrice de l'excitatrice diminue, de sorte que l'excitation de l'alternateur diminue et sa tension diminue plus encore.

Si, pour une diminution de vitesse de 1 0/0, la tension de la machine excitatrice diminue de 2 0/0, la tension de l'alternateur diminue de 3 0/0. Cette *variation cinétique* est, dans les meilleures conditions, triple de la variation de vitesse; elle est quelquefois plus grande. Nous verrons que, pour un bon couplage en parallèle, la diminution totale de vitesse doit être d'environ 5 0/0. Il en résulte une baisse de tension de 15 0/0 qui s'ajoute à la chute de tension due au débit, chute qui est toujours spécifiée à vitesse constante. Cette variation cinétique peut être déterminée avant construction par des moyens très simples, quand on a calculé les caractéristiques de l'alternateur et de l'excitatrice.

La prédétermination des caractéristiques à vide et en charge de l'alternateur avec un cosinus φ quelconque se fait aujourd'hui avec une précision très suffisante en pratique. De nombreuses méthodes ont été imaginées à cet effet, particulièrement par M. Potier, M. Blondel, M. Picou, M. Guilbert, etc... J'emploie personnellement la méthode de M. Potier, qui m'a toujours donné pleine satisfaction dans quelques dizaines d'applications où j'ai eu l'occasion de m'en servir. Je voudrais pouvoir développer cette méthode ce soir et apporter ainsi un faible témoignage de reconnaissance à l'homme dont l'intelligence et le caractère faisaient l'admiration de tous; mais le temps me manque absolument.

Nous arrivons maintenant à la grosse question du couplage en parallèle des alternateurs.

Comme l'a très bien dit M. Janet, il n'y aurait pas eu de régulateur mécanique assez précis pour maintenir le synchronisme de deux alternateurs couplés, s'il n'avait trouvé sa réalisation dans les propriétés mêmes des alternateurs. Il faut songer en effet que, dans une journée environ, deux alternateurs couplés doivent faire rigoureusement 4 millions de périodes tous les deux, sans que l'un fasse une période de plus que l'autre. Cela se produit tout naturellement, parce que deux alternateurs couplés électriquement sont comme reliés mécaniquement par un accouplement élastique. Tant que l'accouplement élastique ne casse pas, les machines se maintiennent en synchronisme. Mais il casse quelquefois, et c'est ce qu'il faut éviter, ce qu'on appelle le *décrochage* étant très dangereux à plusieurs points de vue. Il faut avoir vu se produire un décrochage dans une usine importante pour se rendre compte de ce que cela peut être : lorsque les machines se décrochent, l'obscurité succède à la lumière, les alternateurs se mettent à hurler, les machines à vapeur grognent ; on entend de tous côtés des coups produits par des pièces mécaniques travaillant anormalement ; les fils fusibles sautent avec des bruits comparables à des coups de pistolet, emplissant l'atmosphère des fumées de plomb et de cuivre produites par les arcs dans les coupe-circuits ; on se croirait avec toutes les bêtes d'Ezéchiel. C'est très dangereux, parce qu'il peut se produire des ruptures de pièces mécaniques, et que certains ouvriers perdent pour longtemps l'assurance dont ils ont besoin pour bien conduire le matériel.

Si p est le nombre de paires de pôles, l'accouplement ne casse pas, tant que l'angle que font deux points identiques des deux machines ne dépasse pas environ $\frac{90^\circ}{p}$.

Mais il ne suffit pas d'éviter le décrochage, il faut encore que, lorsque cet angle varie périodiquement pour une cause quelconque, la tension aux bornes ne varie que d'une manière insensible. On trouve alors que, pour une variation de tension de 1 1/2 0/0, l'angle ne doit pas dépasser $\frac{20^\circ}{p}$, c'est-à-dire, par exemple, 1° pour deux machines ayant 40 pôles. Cette variation de tension de 1 1/2 0/0 commence à être sensible sur des lampes à incandescence, quand elle est rythmée.

On a intérêt, pour simplifier l'étude des couplages, à considérer non pas deux alternateurs identiques, mais un alternateur couplé avec un réseau, lequel peut être symbolisé par un autre alternateur infiniment grand et de vitesse, ou fréquence, rigoureusement constante. Les formules sont les mêmes, mais l'esprit est débarrassé d'une sujétion ; l'angle en question, l'*écart angulaire*, doit alors être réduit de moitié, $\frac{10^\circ}{p}$, puisque la machine idéale occupe la position moyenne entre les deux machines considérées tout d'abord.

Un alternateur couplé sur un réseau constitue donc un système en équilibre stable qui, *a priori*, doit jouir de toutes les propriétés des systèmes physiques analogues et, plus particulièrement, doit donner lieu aux phénomènes de résonance.

C'est en effet ce qui se vérifie. Mais il ne faudrait pas croire que les idées des électriciens aient toujours été aussi nettes qu'elles le sont aujourd'hui à cet égard. Si vous voulez bien en effet tenir compte de ce que ce système en équilibre tourne en même temps, ce qui empêche de voir exactement ce qui se passe expérimentalement et modifie d'ailleurs parfois considérablement la forme des équations, comme vous verrez tout à l'heure ; si vous voulez tenir compte ensuite de ce fait qu'il peut se produire des oscillations de trois natures différentes : des oscillations libres, des oscillations forcées dues au couple moteur et des oscillations dues à l'ensemble du système complexe formé par le groupe et son régulateur de vitesse ; si vous voulez tenir compte enfin de ce que l'amortissement, qui est toujours positif dans les systèmes physiques ordinaires, peut être parfois négatif ici, vous reconnaîtrez que les phénomènes ont dû se présenter dès l'abord sous une apparence plutôt rébarbative, et que, s'il est facile aujourd'hui d'en faire l'exposition ou l'enseignement avec simplicité, cela ne doit pas faire oublier toute la peine qu'il a fallu se donner pour arriver à ce résultat.

Le couple élastique C_s, c'est-à-dire le couple qui tend à ramener l'alternateur en coïncidence de phase avec le réseau quand l'écart angulaire est d'un radiant, est donné, à vide, par la formule suivante :

$$C_s = C_N p k,$$

C_N étant le couple en charge, p et k ayant été définis précédemment.

En charge, ce couple synchronisant est un peu différent, mais je ne peux pas insister sur ce point, je n'en ai pas le temps.

La pulsation propre de l'alternateur couplé, c'est-à-dire le rapport de 2π à la période, est :

$$\alpha_a = \frac{2\pi}{\tau_a} = \sqrt{\frac{C_s}{J}},$$

J étant le moment d'inertie de la partie tournante.

Ceci posé, supposons d'abord que nous puissions négliger la variation du couple moteur dans un tour et les perturbations venant du régulateur ; si l'on écarte l'alternateur de sa position d'équilibre, il y revient après une série d'oscillations de pulsation voisine de α_a, quand l'amortissement est faible.

Quelle cause peut écarter l'alternateur de sa position d'équilibre ? Il y en a plusieurs. La plus importante est un changement brusque dans l'admission de la vapeur dans la machine. Il peut arriver que la machine à vapeur, si bien qu'elle soit faite, donne lieu de temps à autre à une cylindrée de vapeur différente de la précédente, ce qui correspond à une impulsion communiquée au système. Il faut que l'élongation qui résulte de cet apport d'énergie W_e ne dépasse pas une valeur convenable : $\frac{45^\circ}{p}$, pour éviter le décrochage, et même moins, si l'on ne veut pas en sentir les effets sur la lumière. C'est ici qu'on voit l'influence de la rotation. Si la machine ne tournait pas, l'élongation serait indépendante de l'inertie ; elle serait :

$$\theta_m = \sqrt{\frac{2W_e}{C_s}}.$$

En effet, l'élongation d'un balistique qui est dépendante de l'inertie, quand on envisage la quantité de mouvement appliquée au système, est indépendante quand on envisage l'énergie introduite dans le système. Mais, si le balistique est en même temps en rotation et contient une quantité d'énergie emmagasinée

$$W = \frac{1}{2} J\Omega_m^2$$

(Ω_m étant la vitesse angulaire moyenne), l'élongation n'est pas indépendante de W. Lorsque W_e est petit devant W, et c'est le cas ici,

cette élongation est approximativement :

$$\theta_m = \frac{W_e}{\sqrt{2WC_s}},$$

en négligeant l'influence de l'amortissement.

L'élongation est donc limitée par l'inertie de la machine et par le couple élastique, qui doivent avoir tous deux une valeur convenable.

J'ai dit tout à l'heure que l'alternateur revient à sa position d'équilibre lorsque, sous l'influence d'une pulsation brusque, il en a été écarté. Il n'y revient pas toujours. Il y a des alternateurs qui, au moment où on les couple — il y a toujours là une élongation — donnent lieu à des oscillations qui s'amplifient indéfiniment jusqu'au décrochage.

Dans ces alternateurs, l'amortissement est *négatif*. La cause de cet amortissement négatif n'est pas encore bien connue ; cependant il y a tout lieu de croire, à l'heure actuelle, qu'il est dû à l'hystérésis de l'induit.

Généralement, l'amortissement est positif. Voici d'où vient cet amortissement.

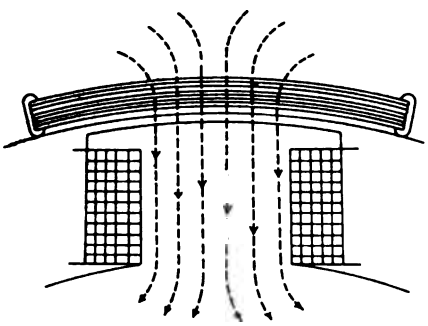

Fig. 3. — Flux antagoniste d'un alternateur débitant des courants déwattés.

Supposons un alternateur débitant du courant déwatté ; l'inducteur tourne par rapport à l'induit, qui est le siège de courants alternatifs. On se fait une idée assez exacte de l'influence réciproque de ces deux parties en supposant (*fig.* 3) qu'elles sont fixes toutes deux et qu'une bobine induite telle que celle représentée est parcourue par du courant continu. Le flux induit est alors celui représenté en pointillé, c'est un flux *antagoniste*.

Mais, si nous supposons que l'inducteur oscille autour d'une position moyenne, il en résulte des variations de ce flux antagoniste dans les pôles. Ces variations de flux produisent dans la bobine inductrice une force électromotrice. Cette bobine est presque en court-circuit, car l'ensemble des bobines inductrices est fermé sur l'excitatrice, dont la résistance intérieure et la self-induction sont complètement négligeables en regard de la résistance et self-induction des inducteurs.

La force électromotrice induite dans la bobine y produit donc un courant alternatif de fréquence égale à celle des oscillations, et de grande intensité, qui réagit sur la bobine de l'induit. Un certain amortissement se produit en vertu de la loi de Lentz.

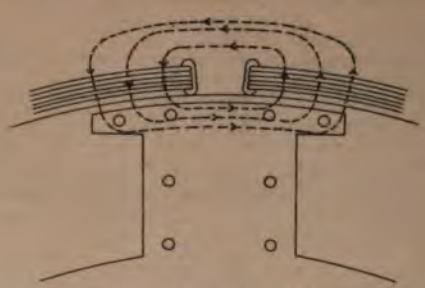

Fig. 4. — Flux transversal d'un alternateur débitant des courants wattés.

Le courant watté produit au contraire un flux transversal tel que celui représenté en *fig.* 4, qui ne passe pas à travers la bobine inductrice. Mais, si le pôle est plein, les oscillations y développent des courants de Foucault qui s'opposent encore au mouvement, moins énergiquement cependant que dans le cas précédent, la résistivité du fer étant plus grande. Si le pôle est feuilleté, il semble qu'il n'y ait plus d'amortissement pour le courant watté ; mais, comme il faut assembler les tôles constituant ce pôle au moyen de rivets ou boulons tels que ceux figurés, il se forme encore des courants amortisseurs très énergiques.

Dans le but d'avoir toujours un amortissement énergique, M. Leblanc a imaginé de placer dans l'inducteur ce qu'il a appelé un *amortisseur* (*fig.* 5). Les masses polaires sont percées de trous comme il est indiqué; dans ces trous passent des barres de cuivre, et de chaque côté, à chaque extrémité, ces barres de cuivre sont soudées à un cercle de cuivre. Les flux traversent ainsi des circuits peu

résistants, et l'amortissement ainsi obtenu est, d'après l'auteur, plus énergique que celui obtenu même avec des pôles pleins.

Fig. 5. — Disposition d'un amortisseur Leblanc.

Cet amortisseur a été l'objet de beaucoup d'applications, surtout en Allemagne et aux États-Unis : en Allemagne pour les alternateurs, et aux États-Unis pour les commutatrices, qui sont des alternateurs sous une forme différente.

Fig. 6. — Alternateurs munis d'amortisseurs Leblanc.

Voici (*Projection*) (*fig.* 6) une photographie de deux alternateurs munis d'amortisseurs Leblanc.

L'amortissement a pour effet de réduire non seulement les élongations dont nous avons parlé tout à l'heure, mais les oscillations forcées auxquelles nous arrivons maintenant.

Considérons un moteur à vapeur à pistons avec son couple variable

pendant un tour, mais en supposant encore qu'il n'y ait pas de régulateur de vitesse ; ce couple peut être exprimé en série de Fourier. En faisant l'analyse sur un grand nombre de machines, on trouve que cette série de Fourier comprend toujours comme terme fondamental celui qui correspond à la rotation de la machine. Si la vitesse angulaire de rotation de la machine est Ω_m, le terme fondamental est en $\sin(\Omega_m t + \psi_1)$.

L'analyse montre encore que les machines monocylindriques donnent lieu à des variations du couple plus grandes que les machines polycylindriques, ce qui se comprend bien.

On peut résumer ces analyses en disant :

La série contient : le couple moyen C_m, plus des termes harmoniques qui, rapportés à C_m, ont pour valeur environ :

	Rang	Demi-charge	Pleine charge
Machine monocylindrique	1	0,12	0,14
— —	2	0,9	0,9
— —	3	0,12	0,11
— —	4	0,4	0,11
Machine polycylindrique	1	0,1	0,1
— —	2	0,5	0,2
— —	3	0,35	0,15
— —	4	0,4	0,4

Une première remarque est importante à faire : c'est qu'il y a des termes impairs. *A priori*, une machine à un piston devrait donner deux variations du couple par tour, une variation par coup de piston.

C'est en effet ainsi, mais il y a, en plus, une impulsion par tour ayant son origine dans la dissymétrie du couple moteur, dissymétrie provenant de l'obliquité de la bielle sur la tige du piston. Il est facile de voir, en considérant deux positions de la manivelle à 180° l'une de l'autre, que, pour la même pression dans le cylindre, les couples correspondants ne sont pas égaux. En résumé, tous les termes impairs de la série de Fourier proviennent de l'obliquité de la bielle sur le piston, et tous les termes pairs proviennent des coups de piston.

Quelques auteurs ont cru pouvoir négliger l'influence du premier terme de la série : c'est celui qui est le plus dangereux. En effet, ce qui nous intéresse directement, c'est l'écart angulaire. Or, dans la double intégration qu'il faut faire pour passer du couple à l'écart angulaire, chacun des couples harmoniques est divisé par le carré du

rang n^2. Déjà l'écart angulaire résultant du premier terme, pour le groupe isolé, est presque du même ordre de grandeur que celui résultant du second terme. Mais, si l'on considère l'accroissement qui résulte, pour chacun de ces termes, du couplage en parallèle, on constate que c'est presque le premier terme seul qu'il faut considérer.

En effet, par suite du couplage de l'alternateur sur le réseau, l'écart angulaire pour chacun des termes de la série se trouve multiplié par un coefficient σ_n donné par la formule :

$$\sigma_n = \frac{W}{W - W_n},$$

W_n étant lui-même défini par :

$$W_n = \frac{C_s}{2n^2}.$$

Pour le premier terme en particulier, W_n se réduit à :

$$W_n = \frac{C_s}{2}.$$

Le couplage a donc pour effet d'augmenter la grandeur de l'écart angulaire produit par la machine à vapeur considérée isolément, puisque σ est toujours plus grand que 1.

En *fig.* 7 est tracée la courbe de σ en fonction de W, qui est évidemment une hyperbole équilatère, pour le premier harmonique par exemple. L'unité adoptée en abscisses est le volant de *résonance* W_r, autrement dit le volant W_n pour $n = 1$ (1).

En poussant la discussion à fond, on reconnaît qu'il ne faut pas songer à marcher avec un volant compris entre W_r et W_2 ; non pas que cela soit impossible : c'est simplement imprudent.

On est ainsi conduit pratiquement à faire $W > W_r$, et l'on constate alors une faible augmentation des harmoniques autres que le premier.

Si l'on adopte un volant égal à deux fois le volant de résonance, σ est égal à 2 pour le premier terme : le premier terme se trouve doublé par le couplage. Quant au deuxième terme, il n'est augmenté que de 14 0/0. Le troisième est augmenté de 6 0/0. Si l'on

(1) Sur la même figure sont tracées les courbes de σ avec amortissement très énergique dans deux cas extrêmes : $pk = 20$ et $pk = 160$.

adopte un volant plus léger, c'est encore pis : lorsque σ vaut 11 pour le premier terme, il n'est que 1,3 pour le second. Dans tous les cas, on peut laisser de côté tous les termes de la série de Fourier qui suivent le premier; il suffit, en général, d'examiner le premier terme et de faire que σ soit faible pour ce premier terme.

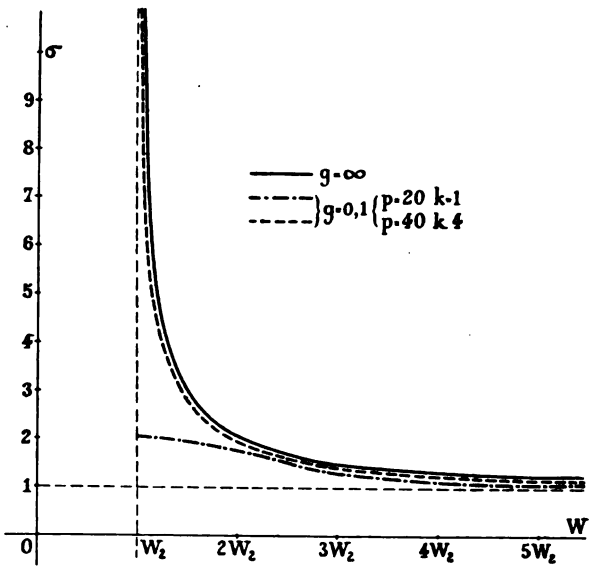

Fig. 7. — Accroissement de l'écart angulaire par le couplage en parallèle.

Si l'on tient compte de la variation de C_s avec la charge, on est conduit à adopter, pour les machines à vapeur, un volant minimum :

$$W = pC_N \frac{k+2}{2},$$

qui donne lieu à un écart $p\theta$ plus petit que 10° dans tous les cas. Mais, me direz-vous peut-être, pourquoi ne pas augmenter plus ce volant et le faire très lourd dans tous les cas pour s'éloigner franchement de la résonance?

D'abord parce que cela coûte : la fonte n'est pas chère; mais il faut la payer tout de même. Ensuite parce qu'il y a quelquefois des inconvénients sérieux à avoir un volant trop lourd. J'y reviendrai tout à l'heure à propos des oscillations dues au régulateur de vitesse; mais je puis faire remarquer déjà qu'un volant trop lourd

peut gêner beaucoup pour l'opération de la mise en parallèle. Un volant infini conduirait à une impossibilité de coupler sur un réseau : car il est impossible d'obtenir que la vitesse de la machine avant couplage soit exactement la vitesse voulue. Si le volant était infini, au moment du couplage la machine continuerait à tourner avec sa vitesse propre ; aucune force ne serait suffisante pour la ramener à la vitesse correspondant à la fréquence du réseau.

Un calcul simple montre qu'avec un volant dépassant 4 ou 5 fois le volant de résonance, on peut être très ennuyé quelquefois, lors de l'opération de la mise en parallèle...

Avant de passer à l'influence du régulateur de vitesse, je voudrais, pour ceux qui ne sont pas très au courant des phénomènes de résonance, insister sur ce fait de l'amplification de l'écart angulaire par le couplage, au moyen d'une image simple.

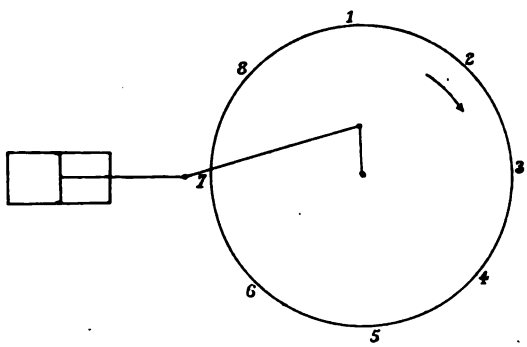

Fig. 8.

Nous avons vu que, pour les perturbations passagères, le couple élastique est limitatif des élongations produites. C'est, au contraire, ce couple élastique qui amplifie les oscillations quand les perturbations sont périodiques, étant donné que le volant est plus grand que le volant de résonance. Supposons une machine à vapeur monocylindrique (*fig.* 8) et, laissant de côté les termes impairs, considérons le deuxième terme seulement dû aux coups de piston. Le couple moteur est évidemment maximum quand le point A se trouve précisément dans la position 1, c'est-à-dire comme sur l'image. Il est nul dans la position 3. Il est de nouveau maximum dans la position 5, et nul dans la position 7.

Mais ce couple se compose de deux parties, le couple constant correspondant au travail produit et un couple alternatif. Ce couple alternatif est maximum et positif en 1, maximum et négatif en 3. La vitesse est en retard d'un quart de période sur le couple ; elle est donc maxima et positive en 2, et l'écart angulaire, étant en retard d'un quart de période sur la vitesse, est maximum et positif en 3.

Dans cette position 3, le couple élastique s'oppose donc au mouvement, il est négatif. Or précisément le couple alternatif est négatif aussi dans cette position. Le couple élastique ajoute donc son effet à celui du couple alternatif moteur : il est perturbateur au même titre que celui-ci.

On peut dire que, dans les phénomènes mécaniques ayant un caractère oscillatoire, l'élasticité peut être considérée comme une inertie négative, de même que, pour les courants alternatifs, la capacité peut être considérée comme une self-induction négative.

Nous avons jusqu'ici fait abstraction de l'influence du régulateur de vitesse ; mais cette influence est très grande, encore que peu précisée, ce qui résulte de ce que l'on a affaire à un ensemble très complexe. On est cependant d'accord sur quelques points principaux, en particulier sur la nécessité d'un *écart de réglage* assez grand.

Traçons (*fig.* 9) la courbe de la vitesse angulaire d'un moteur en fonction de la charge. Quand on charge, la vitesse décroît. On appelle écart de réglage la différence entre le nombre de tours que le moteur fait à vide et en charge, rapportée au nombre de tours en charge :

$$K = \frac{N_v - N_c}{N_c}.$$

Tout le monde est d'accord sur ce point, que l'écart angulaire doit être important. S'il était nul pour deux machines couplées, c'est-à-dire si la vitesse ne changeait pas du tout avec la charge, quelle raison y aurait-il pour que la charge de chaque machine soit définie ?

Pour une même vitesse, toutes les charges seraient possibles dans chaque machine. La charge pourrait passer d'une machine à l'autre indifféremment. Il faut donc qu'il y ait une variation de vitesse avec la charge, et on a reconnu que cette variation de vitesse devait être de 4 à 5 0/0 au moins.

La considération d'une bonne répartition des charges conduit donc à l'adoption d'un grand écart de réglage. Il en est de même de la

théorie des oscillations dues au régulateur. J'ai déjà dit que cette question est très complexe.

Nous avons en effet en présence un groupe électrogène doué d'élasticité, d'inertie et d'amortissement, et un régulateur de vitesse également doué d'élasticité, d'inertie et d'amortissement, l'un réagissant sur l'autre avec un certain retard.

Je dois vous dire qu'il n'y a pas à cet égard de théorie qui ait reçu la sanction complète de l'expérience. Je vous demande cependant la permission de vous en exposer une qui, bien que relativement récente, est suffisamment d'accord avec les faits connus pour qu'elle vaille la peine d'être présentée à défaut d'une autre.

Il y a dans cette question une grandeur qui y joue un très grand rôle, c'est le *retard de distribution*. Supposez un groupe électrogène en train d'osciller ; le couple n'est pas maximum juste quand le régulateur se trouve dans la position inférieure, parce que le fluide met un certain temps à passer et à produire ses effets.

J'appelle retard de distribution le temps qui s'écoule entre le moment où l'index du régulateur est dans sa position inférieure et le moment où le couple moyen est maximum.

Même dans une machine monocylindrique, où on pourrait croire que le retard de distribution est nul, il ne l'est pas, parce que c'est au commencement de la course que se fait l'admission de la vapeur, tandis qu'elle agit pendant toute la course; il y a donc un retard de distribution d'environ un quart de tour.

Dans une machine polycylindrique, le retard de distribution est plus grand, puisque la vapeur agit successivement dans les cylindres en passant par les réservoirs intermédiaires ; il peut atteindre la durée d'un tour et demi.

Nous avons donc à considérer dans le problème :

La pulsation α_a de l'alternateur (et son volant), son amortissement ;

La pulsation α_r du régulateur et son amortissement, lequel, pour simplifier, nous supposerons égal à m fois l'amortissement critique, c'est-à-dire l'amortissement le plus faible avec lequel le système élastique revient à sa position d'équilibre sans la dépasser ;

Le retard de distribution τ_d ;

Enfin l'écart de réglage K_1, non plus l'écart moyen entre le vide et la charge, mais l'écart pour chaque charge, défini (*fig.* 9) par

$$K_1 = \frac{N_0 - N_2}{N_1}.$$

Nous laisserons de côté les variations du couple dans un tour.

Nous pouvons alors partir de cette hypothèse que le couple moteur, à un instant quelconque, a une certaine forme périodique: une constante plus un cosinus. De cette forme, nous déduisons les oscillations de la vitesse. Les oscillations de la vitesse permettent de déduire les oscillations dans la position de l'index, et les oscillations dans la position de l'index donnent de nouveau le couple moteur.

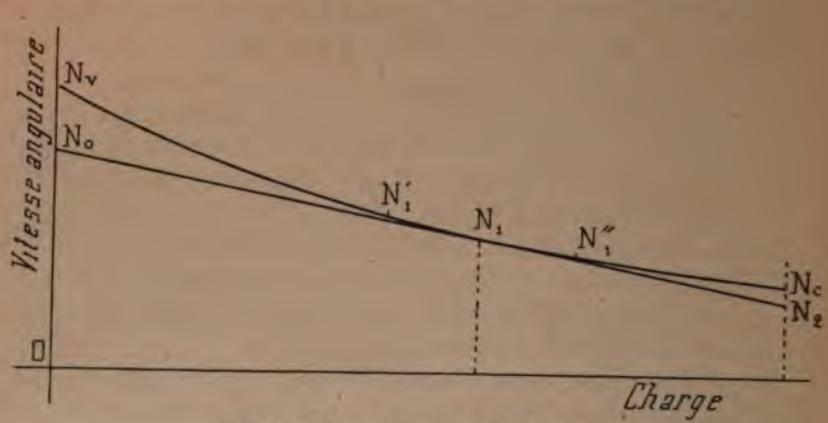

Fig. 9. — Écart de réglage d'un moteur.

Mais, si nous posions l'égalité de ces deux couples moteurs, nous écririons ainsi que le système se trouve dans des conditions telles que les oscillations continuent indéfiniment sans s'amplifier ni s'amortir, sans diverger ni converger, et c'est là un cas tout particulier qui ne se trouve presque jamais réalisé. Généralement, ces deux couples ne sont pas égaux; si le couple auquel on arrive en fin de calcul est plus grand que celui dont on est parti, les oscillations s'amplifient; dans le cas contraire, elles s'amortissent. Seulement il faut que ces deux couples soient en phase. L'égalité des phases entraîne une première équation que j'appelle relation de fréquence; l'inégalité des couples entraîne une deuxième inéquation que j'appelle: relation de convergence.

Ces deux relations permettent de discuter la question dans toute sa généralité. Elles montrent d'abord que, dans tous les cas, on évite d'autant mieux les oscillations que K_1 est plus grand.

Voyons d'abord à quoi elles conduisent pour un groupe isolé. La

relation de fréquence prend une forme très simple quand le groupe est isolé :

$$\operatorname{tg} \alpha\, \tau_d = \frac{1}{2m}\left(\frac{\alpha_r}{\alpha} - \frac{\alpha}{\alpha_r}\right),$$

où α est la pulsation $\frac{2\pi}{\tau}$ des oscillations qui se produisent.

Cette relation donne pour α en fonction de τ_d une série de courbes; mais toutes ces courbes ne répondent pas à la réalité. Lorsque l'on cherche quelles valeurs de α satisfont aux conditions de signe, on s'aperçoit que la moitié des courbes disparaît.

Par exemple, pour $m = 1$ et $\alpha_r = 6{,}32$, il ne subsiste que les courbes portées en *fig.* 10.

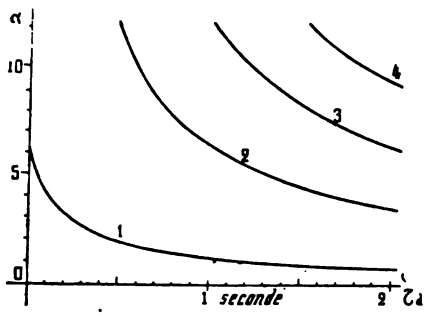

Fig. 10. — Fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe isolé.

Si l'on se reporte ensuite à la relation de convergence, on reconnaît que les fréquences correspondant à la plus basse de ces courbes donneront plus facilement lieu à des oscillations divergentes ; c'est donc pour cette courbe seulement qu'il convient d'utiliser la relation de convergence.

Celle-ci conduit à la conclusion suivante :

Il faut adopter, pour un écart de réglage déterminé, un volant d'autant plus lourd que le retard de distribution est plus grand.

Maintenant, passons au groupe couplé. La relation de fréquence est la même, s'il n'y a pas d'amortissement dans l'alternateur.

En vérité, il ne faut pas admettre un amortissement complètement nul, mais très petit et positif. Quoique la relation de fréquence reste alors la même, si l'on cherche quelles valeurs de α satisfont aux conditions de signe, on trouve que les circonstances sont tout à fait changées. On s'aperçoit que, des courbes précédentes qu'il

fallait adopter pour l'alternateur isolé, il ne faut conserver que les parties supérieures, tant que $\alpha > \alpha_a$, et qu'au contraire, quand $\alpha < \alpha_a$, il faut prendre les parties inférieures des courbes qui ont dû être rejetées dans le cas précédent. Il faut, de plus, relier par des parties de la droite horizontale, $\alpha = \alpha_a$, les portions de courbes ainsi obtenues (*fig.* 11). En effet, quand $\alpha > \alpha_a$, l'influence de l'inertie domine, et les choses se passent comme si elle était seule ; quand $\alpha < \alpha_a$, l'élasticité domine, et les choses se passent comme si l'inertie était seule, mais négative.

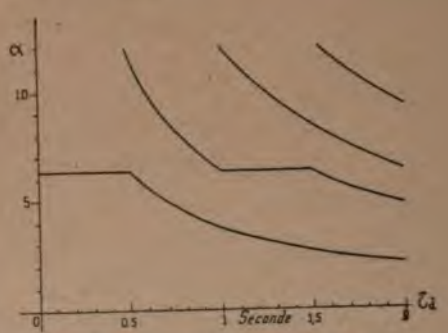

Fig. 11. — Fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe couplé.

Vous savez que dans un système au voisinage de la résonance la phase passe assez brusquement de 0 à π pour de faibles variations de la fréquence, d'autant plus brusquement que l'amortissement est plus faible.

C'est ce qui fait qu'ici le retard de distribution peut changer brusquement d'une demi-seconde, sans que la fréquence des oscillations change de façon sensible.

Lorsque l'amortissement de l'alternateur est fort, la forme de ces courbes se trouve modifiée. Au lieu de se faire par des droites, le raccordement entre les courbes se fait par des lignes courbes et inclinées. Si l'amortissement est négatif, le raccordement, au lieu de se faire par les parties de droite représentées, se fait par les portions de la droite qui manquent justement ici.

Revenons à la *fig.* 11. Pour un retard de distribution compris entre 0 et 1/2 seconde, ou entre 1 et 1,5 seconde, la fréquence des oscillations qui se produisent (α) est égale à la fréquence propre d'oscillation de l'alternateur (α_a). Or la relation de convergence d'un groupe couplé

sans amortissement contient en facteur $\left(1 - \frac{\alpha_a}{\alpha}\right)$; c'est-à-dire qu'il n'y a pas moyen de marcher théoriquement avec un amortissement tout à fait nul et des retards de distribution correspondant à ces valeurs. Heureusement, en pratique, il y a toujours un peu d'amortissement dans l'alternateur, et l'on peut, dans certains cas, marcher même dans les paliers dangereux. C'est difficile; il faut que l'amortissement du régulateur soit très grand pour arriver à satisfaire à la relation de convergence dans ces conditions ; cependant on peut y arriver encore quelquefois. Mais il vaut mieux éviter franchement les zones dangereuses en adoptant un retard de distribution compris dans les zones non dangereuses, ou en modifiant certaines conditions, comme la période du régulateur.

Voyons maintenant quelle peut être l'influence du volant sur les oscillations venant du régulateur.

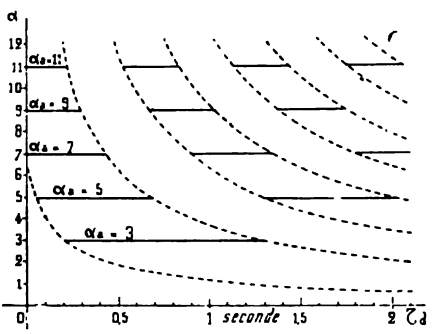

Fig. 12. — Influence du volant sur la fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe couplé.

L'augmentation du volant a pour effet de faire descendre la ligne horizontale ($\alpha = \alpha_a$), sur laquelle se font les raccordements entre les courbes de α. Mais (*fig.* 12), en s'abaissant, les lignes de raccordement s'allongent; c'est-à-dire qu'en admettant un volant de plus en plus lourd, la région dangereuse s'étend de plus en plus en se portant vers la droite. Si la machine est à petit retard de distribution (monocylindrique, ou turbine), l'opération est avantageuse; si la machine est à grand retard de distribution (polycylindrique), l'opération est mauvaise. C'est pourquoi, en particulier, les Américains, qui abusent volontiers des grands volants, comme de bien des grandes choses,

ont été parfois dans l'impossibilité de marcher en parallèle à cause des oscillations des régulateurs.

Il ne me reste plus qu'à vous parler du compoundage des alternateurs.

Je vous expliquais tout à l'heure qu'il y a aux bornes d'un alternateur ordinaire des variations de tension dues à deux causes : la variation du débit et la variation de vitesse. Si, au lieu de considérer la tension aux bornes de l'alternateur, on considère celle à l'extrémité d'une ligne desservie par l'alternateur, ces variations sont encore plus grandes, puisque la chute en ligne est dans le même sens que la chute dans l'alternateur.

De là deux nécessités : 1° d'avoir des alternateurs à faible chute de tension et à faible variation cinétique quand la charge varie constamment ; 2° de corriger la variation de tension à la main en agissant sur l'excitation.

La première obligation entraîne, ainsi que vous avez vu, une dépense d'acquisition plus grande pour l'alternateur ; la seconde, une dépense de personnel. Quelques ingénieurs ont alors pensé qu'il serait intéressant de compounder les alternateurs comme on a fait pour les dynamos, de manière que la tension se maintienne constante et, au besoin, qu'elle augmente avec la charge.

L'idée d'agir sur l'excitation en fonction de la charge est très ancienne, mais les premières tentatives étaient grossièrement réalisées par des procédés barbares, et il n'y a que quelques années que l'on possède des solutions à peu près parfaites. Il convient de séparer ces solutions en deux classes : les compoundages purement physiques, dans lesquels les courants alternatifs débités agissent directement sur l'état magnétique de l'excitatrice, et les compoundages électromécaniques, dans lesquels le courant débité agit sur le rhéostat d'une excitatrice ordinaire par un procédé mécanique.

Voyons les premiers. Le courant débité étant alternatif et le courant d'excitation continu, il faut un intermédiaire entre les deux pour qu'ils agissent l'un sur l'autre, intermédiaire auquel on peut encore donner le nom d'excitatrice.

Pour une même intensité débitée, l'excitation devant augmenter plus lorsqu'elle est déwattée que lorsqu'elle est wattée, il faut que le système réalise de lui-même des variations d'excitation qui soient non seulement fonction du courant, mais aussi de sa phase. Enfin,

comme on ne peut pas obtenir un courant continu sans un collecteur, il faut encore que la position des balais sur ce collecteur reste invariable, quand le débit et le cos φ de l'alternateur varient.

Il faut, en outre, que l'excitation augmente plus que si la vitesse restait constante, puisque celle-ci diminue avec la charge ; cela est facile.

Ayant l'expérience de ces machines, j'ajouterai qu on est presque toujours conduit à les réaliser avec hypercompoundage, malgré la diminution de vitesse en charge.

Je ne citerai que pour mémoire le compoundage de M. Leblanc : l'intermédiaire entre le courant alternatif et le courant continu est une commutatrice à deux induits. Ces deux induits reçoivent d'abord un seul enroulement continu ordinaire aboutissant à un collecteur. Chaque induit reçoit en outre un enroulement spécial, le premier qui se trouve placé en série dans le courant débité par l'alternateur, et le second alimenté par une dérivation prise sur l'induit de cet alternateur. M. Leblanc a réalisé une telle machine, à titre d'essai, et, d'après les résultats d'expériences fournis, elle a donné un compoundage très satisfaisant pour l'industrie. Mais, je ne sais pourquoi, il n'y a pas d'applications de ce système.

Dans mon procédé de compoundage, l'organe intermédiaire est une dynamo à enroulements sinusoïdaux (*Projection, fig.* 13). Le stator, ou partie fixe, a toute l'apparence d'un induit d'alternateur ou d'un stator de moteur à champ tournant. Ce stator reçoit des courants polyphasés, qui y produisent un champ tournant. Ce champ tourne avec une vitesse déterminée par le nombre de pôles de la machine.

Le rotor a tout à fait l'aspect extérieur d'un induit de dynamo à courant continu, mais possède deux enroulements dont les nombres de spires sont des fonctions sinus de l'angle de position sur l'induit. Par un rapport convenable entre la vitesse du champ et celle de l'induit et des positions convenables des balais, le courant recueilli sur le collecteur est continu.

Le nombre de pôles de l'excitatrice peut être différent de celui de l'alternateur, 1/2, 1/3 ou 1/4, ce qui permet la réalisation dans tous les cas sans engrenages pour les alternateurs tournant à plus de 150 ou 200 tours par minute.

Le stator étant isolé du rotor peut être alimenté directement par l'alternateur même pour les tensions élevées.

Enfin la variation convenable de l'excitation est obtenue par un

Fig. 13. — Dynamo excitatrice à enroulements sinusoïdaux.

transformateur de compoundage (*Projection*, *fig.* 14) monté selon le schéma de la *fig.* 15.

Fig. 14. — Transformateur de compoundage.

Ce système a reçu d'assez nombreuses applications. Il y a actuel-

lement 60 ou 70 alternateurs de ce type en fonctionnement courant.

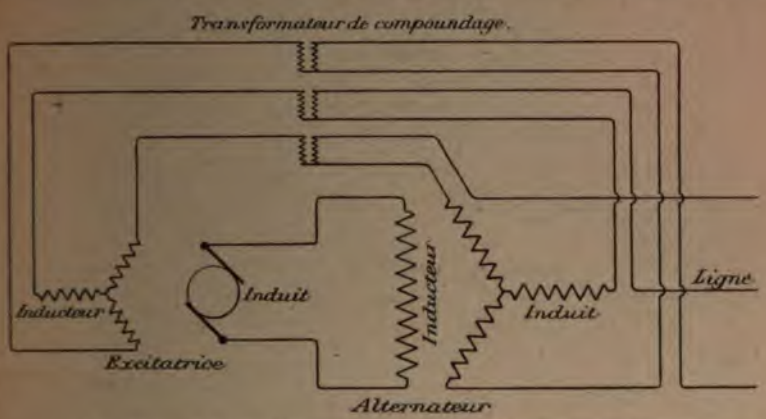

Fig. 15. — Schéma de montage des éléments d'un alternateur compound Boucherot.

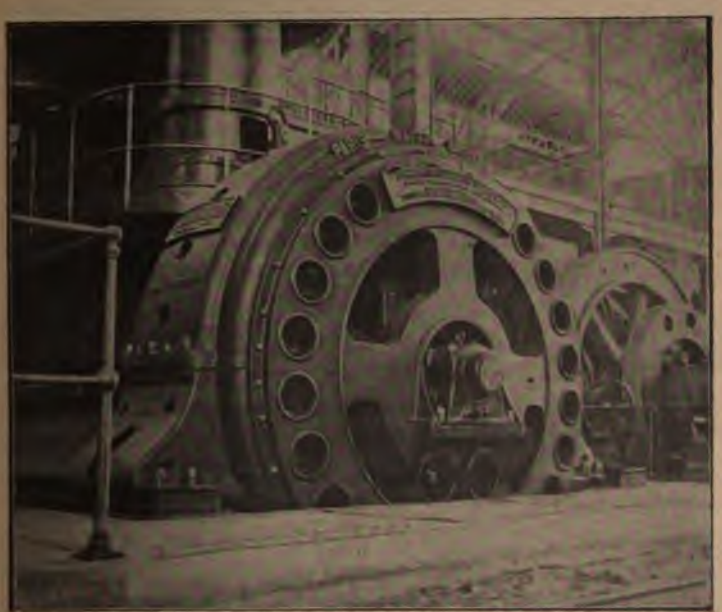

Fig. 16. — Alternateur-volant compound Boucherot de 850 kilovolt-ampères à 250 tours par minute. Excitatrice sur l'arbre, derrière.

Je vais vous en montrer quelques-uns (*Projections*) (Voir *fig.* 16, 17,

Fig. 17. — Alternateur compound pour turbines de Laval.
Groupe de 150 kilovolt-ampères à 1.000 tours par minute, même système.

Fig. 18. — Alternateur compound formant partie d'un groupe de trois identiques,
de 4 00 kilovolt-ampères à 315 tours par minute, même système.

Fig. 19. — Alternateur-volant compound de 850 kilovolt ampères- à 65 tours par minute, excitatrice mue par engrenages, même système.

Fig. 20. — Turbo-alternateur compound Boucherot de 600 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

18, 19, 20, alternateurs de diverses puissances à vitesses comprises entre 65 à 3.000 tours par minute).

Toutes ces machines sont construites par la maison Bréguet.

Je passe au compoundage de M. Blondel.

L'organe intermédiaire est une commutatrice E (*Projection, fig.* 21), dont l'inducteur reçoit une excitation constante de la part d'une petite dynamo auxiliaire E′ et une autre variable de ses balais, et dont l'induit, côté bagues, est relié au secondaire d'un transformateur dont le primaire est parcouru par le courant débité par l'alternateur A. L'induit, côté collecteur (droite), alimente les inducteurs de l'alternateur. Ce sont les variations dans l'intensité et la phase des courants passant par les bagues qui provoquent les variations voulues de la tension au collecteur.

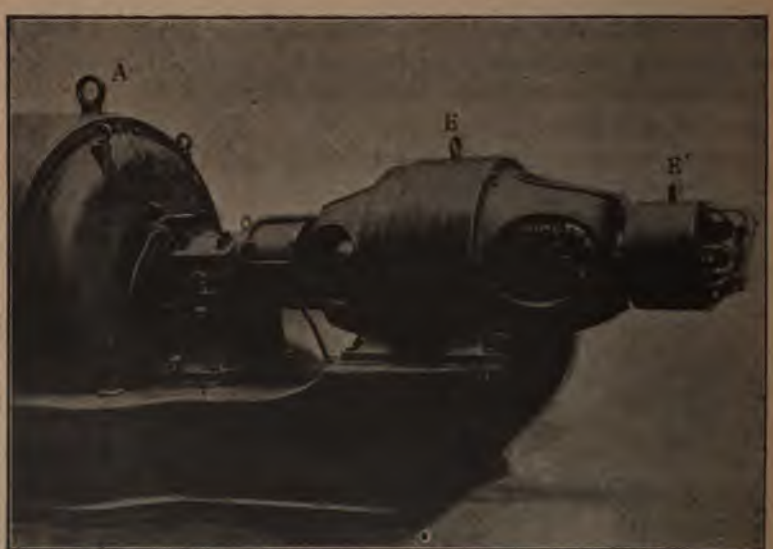

Fig. 21. — Alternateur compound Blondel de 500 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

L'application est faite ici à un turbo-alternateur donnant 500 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

Il y a, je crois, six ou sept applications de ce système, réalisées par la maison Sautter-Harlé.

Avec ces deux systèmes, je ne puis citer, comme ayant reçu des

applications, en France tout au moins, que celui d'Heyland, construit par la Société Alsacienne.

Dans ce dernier, il n'y a pas d'excitatrice, ce qui, pour un observateur superficiel, semble un avantage ; les bobines inductrices, divisées en un certain nombre d'éléments reliés à un collecteur, reçoivent ainsi des courants issus directement de l'induit de l'alternateur, ou, plus exactement, transformés de ceux-ci, et convenablement redressés par le système de balais et le collecteur.

Cette machine (*Projection*, *fig.* 22) est un alternateur de 75 kilovolt-ampères à 750 tours par minute.

Fig. 22. — Alternateur compound Heyland de 75 kilovolt-ampères à 750 tours par minute.

Cette autre (*Projection*), un alternateur-volant de 550 kilovolt-ampères à 80 tours par minute.

Il y a huit applications de ce système.

J'arrive maintenant aux compoundages dits électro-mécaniques.

Il n'y a pas d'applications de tels systèmes, et je ne vous en aurais pas parlé si M. Janet n'avait éveillé votre curiosité à cet égard.

M. Routin est un des premiers qui se soient occupés de la question. Il a commencé (*Projection*) par se servir du régulateur de vitesse pour modifier l'excitation dans l'alternateur. Mais on ne pouvait faire ainsi qu'un compoundage très imparfait, ne tenant pas compte du cos φ, et, naturellement, on ne pouvait songer à aller loin dans cette voie.

Aussi a-t-il modifié constamment ses dispositions. Voici, m'a-t-il dit, sa disposition définitive, qui date seulement du commencement de cette année ; il prévoit (*Projection*) :

1° Un compensateur électrique à servo-moteur agissant sur le régulateur en fonction de la puissance *ei* cos φ, de manière à maintenir la vitesse constante ;

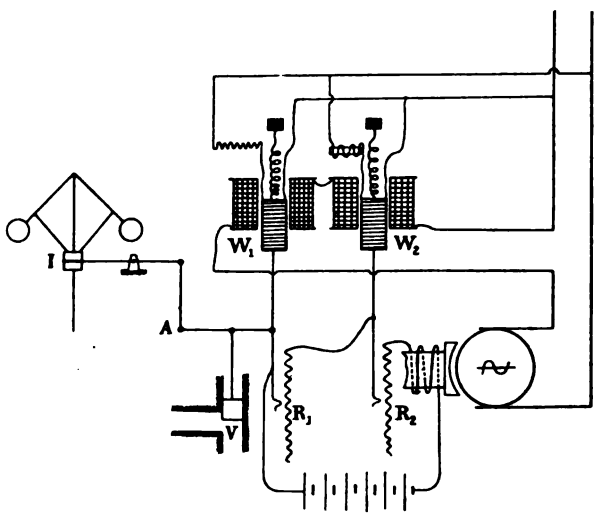

Fig. 23. — Compoundage électro-mécanique Picou.

2° Un modérateur tensimétrique à servo-moteur pourvu d'un compensateur agissant suivant les variations de charge, et d'un compensateur agissant suivant les variations du facteur de puissance.

M. Picou a indiqué dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* de 1903 plusieurs dispositions de compoundages électro-mécaniques.

Je résume ici la plus typique (*Projection*, *fig.* 23) :

On cherche aussi à maintenir la vitesse constante. Supposons cette première partie du problème résolue : l'index I du régulateur peut alors être considéré comme un point fixe, et l'articulation A également. Un premier système électromagnétique W_1 (wattmètre), dont la partie fixe est parcourue par le courant principal et la partie mobile par un courant dérivé, donne une force proportionnelle à *ei* cos φ utilisée : 1° à ouvrir l'admission V du fluide proportionnellement à la puissance ; 2° à manœuvrer un premier rhéostat R_1 agissant sur l'excitation de l'alternateur. Comme ce premier système n'agirait qu'en fonction du débit watté, un deuxième système électromagnétique W_2, dont le fil fin est en série avec une forte self-induction, donne une force proportionnelle à *ei* sin φ, utilisée à manœuvrer un deuxième rhéostat R_2 agissant sur l'excitation de l'alternateur pour le compte du débit déwatté.

Messieurs, j'ai terminé.

Vous voudrez bien m'excuser si je suis entré quelquefois dans des détails trop spéciaux, qui ne vous intéressaient peut-être par tous.

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Par M. Pierre Weiss [1].

Une discussion serrée des conditions de production de la lumière n'étant possible que si elle est appuyée sur la connaissance des lois du rayonnement, nous commencerons par rappeler brièvement ces lois.

Nous devons distinguer deux cas qui diffèrent par l'origine de l'énergie rayonnée. Celle-ci peut être empruntée au réservoir thermique que constitue le corps rayonnant. Ou pour préciser : on peut supposer le corps rayonnant en relation avec une source de chaleur à température constante ou thermostat et envisager l'ensemble des cas où l'énergie rayonnée est empruntée à ce thermostat, sans qu'il y ait, à part cela, altération du corps rayonnant ou apport d'éner-

[1] Conférence faite le 6 juin 1905.

gie de l'extérieur sous une forme ou sous une autre ; tous ces phénomènes constituent le *rayonnement thermique proprement dit*.

Nous formerons un deuxième groupe des phénomènes dans lesquels le corps rayonnant passe d'un état initial déterminé à un état final différent, comme dans l'oxydation du phosphore ou dans le passage du sulfure de calcium de l'état insolé à l'état non insolé. Nous y joindrons ceux où le corps reçoit un apport d'énergie qui n'est pas de la chaleur provenant d'une source à la même température que lui, comme dans la fluorescence excitée par des radiations étrangères ou dans l'émission lumineuse du tube de Geissler provoquée par une dépense de travail électrique. Le terme collectif qui désigne tous ces phénomènes est celui de *luminescence*.

Si nous considérons une cavité fermée de toute part et dont les parois sont à une même température, conformément au principe de Carnot, il n'y a pas d'échange d'énergie entre les différents points de s parois, mais on peut admettre avec Prévost que chaque élément de surface rayonne comme s'il était seul. Il convient alors d'imposer à ces divers rayonnements élémentaires la condition de se compenser mutuellement. C'est ce qu'a fait Kirchhoff. Il en résulte que le milieu, dans la cavité, est sillonné en tous points et dans tous les sens par des radiations de même intensité. Or un élément de paroi quelconque possède un certain pouvoir absorbant a pour toute direction de radiation incidente. Le nombre a indique la fraction de ces radiations qui est absorbée. Comparons cet élément de surface réel à un élément fictif qui absorberait toutes les radiations. Le milieu ne peut être dans le même état devant ces deux éléments de surface que si, pour toute direction, le premier élément de surface compense, par une émission plus faible que le dernier, les radiations qu'il renvoie déjà par diffusion ou réflexion. Il faut donc que, dans toute direction, la radiation absorbée et la radiation émise soient les mêmes et que, par suite, si l'on appelle pour un corps quelconque pouvoir émissif e la puissance qu'il émet dans une direction déterminée, et e_0 la même quantité pour le corps noir,

$$\frac{e}{a} = e_0.$$

Comme tous les corps absorbent très inégalement la lumière, il en résulte que les pouvoirs émissifs sont, eux aussi, inégaux et toujours inférieurs à celui du corps noir théorique auquel M. Guillaume a

donné pour cette raison le nom expressif de « radiateur intégral ».

Ce corps noir n'est réalisé qu'approximativement au moyen du noir de fumée, mais puisqu'en pratiquant dans une cavité isothermique fermée une ouverture infiniment petite on trouble infiniment peu le régime de radiations de cette cavité, cette ouverture infiniment petite réalisera, avec l'approximation que l'on voudra, l'élément de surface du corps noir, tant au point de vue de son absorption que de son émission.

Kirchhoff a montré que la relation entre l'absorption et l'émission s'étendent à toutes les radiations simples et à toutes les directions de vibration qui composent la radiation complexe traversant en tous sens la cavité isotherme. Notons sans la démontrer cette extension de la loi de Kirchhoff aux éléments constitutifs de la radiation, dont la première partie seule est intéressante au point de vue où nous nous plaçons ici.

Remarquons ici que ces conséquences du principe de Carnot ne renseignent que sur la relation entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant pour les radiations qui circulent réellement dans une cavité isotherme à la température considérée, ou, en d'autres termes, qui sont émises par le corps noir à la même température. Pour toutes les autres radiations qui n'y figurent pas, l'existence d'un pouvoir absorbant ne permet en aucune façon de conclure à l'existence d'un pouvoir émissif et ne s'oppose pas à ce qu'il soit nul [1].

En résumé :

Le rayonnement qui sort d'une petite ouverture pratiquée dans une cavité isotherme ou qui émane d'un corps parfaitement absorbant contient chaque radiation simple avec une intensité indépendante de la nature des parois de la cavité et supérieure ou au moins égale à l'intensité de la même radiation simple émise par une surface égale d'un corps quelconque à la même température.

Si nous trouvons que dans certains cas l'émission d'une radiation particulière est plus forte que celle de cette radiation dans le radiateur intégral, nous devons en conclure que ces cas ne relèvent pas du rayonnement thermique, mais qu'ils font partie des phénomènes de luminescence auxquels ces lois ne s'appliquent pas.

Comparons maintenant le rayonnement émis par le radiateur intégral aux différentes températures. La loi de Stephan-Boltzmann,

---

[1] Cotton, *Revue générale des Sciences*, p. 102 ; 1899.

fondée sur la thermodynamique et sur l'existence d'une pression exercée par les radiations sur une paroi qu'elles frappent, nous apprend que l'énergie totale émise par le corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue θ. La constante de cette loi déterminée par Kurlbaum permet d'écrire la puissance rayonnée :

$P = 1{,}28 \times 10^{-12}\theta^4$ petites calories par centimètre carré et par seconde.

Il n'est pas possible de donner actuellement avec la même certitude la loi de la répartition de cette puissance entre les diverses longueurs d'onde. Mais supposons que cette loi soit établie pour une température particulière et représentée par une courbe dont les abscisses sont les longueurs d'onde λ et les ordonnées $\frac{\partial P}{\partial \lambda}$, de sorte que l'aire de la courbe représente P. M. Wien a montré, par un raisonnement reposant sur le principe de Doppler-Fizeau, que l'on passe de cette courbe à celle qui correspond à une autre température en réduisant les abscisses en raison inverse des températures absolues et en multipliant les ordonnées par la cinquième puissance de ce rapport des températures. Ainsi énoncée, cette loi contient la loi de Stephan-Boltzmann.

Il s'ensuit que, dans le passage à une température plus élevée, tout le spectre est déplacé du côté des petites longueurs d'onde.

La *fig.* 1 représente le résultat des expériences de MM. Lummer et Pringsheim sur l'énergie rayonnée par le corps noir en fonction de la longueur d'onde aux diverses températures. Les ordonnées des courbes sont les valeurs de $\frac{dP}{d\lambda}$ et les abscisses les longueurs d'onde. Cette famille de courbes peut être représentée d'une manière assez satisfaisante par la formule de M. Wien :

$$\frac{dP}{d\lambda} = C\lambda^5 e^{-\frac{c}{\lambda\theta}},$$

où C et c sont des constantes, et θ la température absolue. Les lignes pointillées sont celles que donne cette formule. Depuis lors, M. Planck a indiqué une formule :

$$\frac{dP}{d\lambda} = C\lambda^5 \frac{1}{e^{\frac{c}{\lambda\theta}} - 1},$$

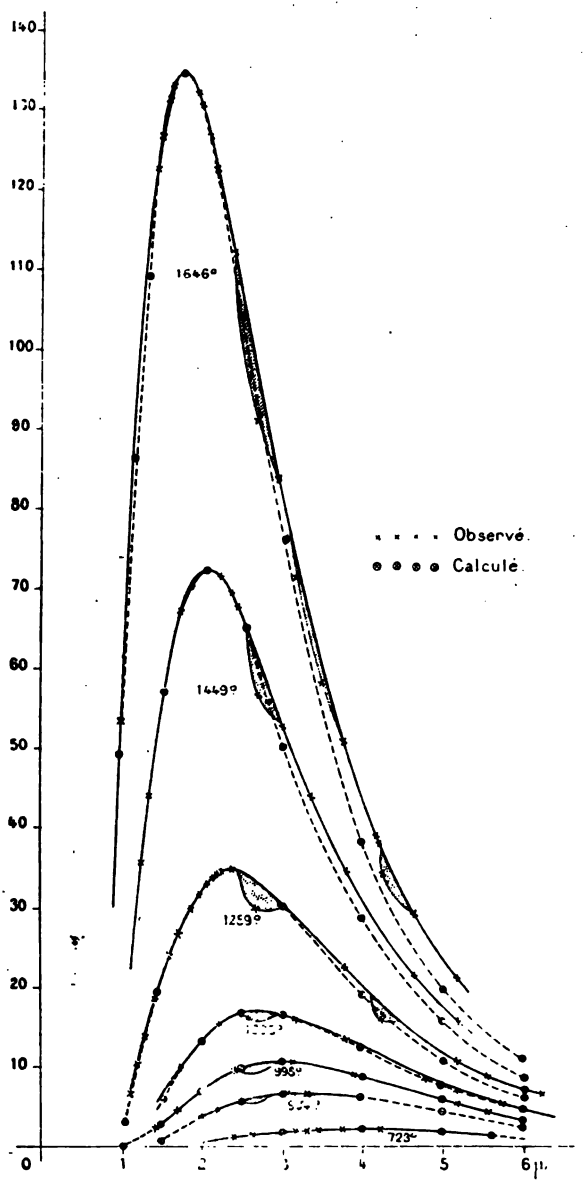
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
5
6 μ.
1646°
1449°
1259°
998°
723°
Observé
Calculé

Fig. 1.

qui est nettement préférable à la précédente dans la région des grandes longueurs d'onde. Ces formules sont l'une et l'autre conformes à la loi de Stephan-Boltzmann et à la loi de Wien.

On peut appeler *sources colorées* l'immense majorité des corps qui ont des propriétés nettement différentes de celles du corps noir. En général, le rapport dans lequel le pouvoir émissif d'un corps sera moindre que celui du corps noir à la même température ne sera pas le même pour les différentes régions du spectre. Certaines couleurs seront plus favorisées que les autres. Ce n'est que dans le cas extrêmement particulier où le rapport du pouvoir émissif à celui du corps noir serait le même dans toute l'étendue du spectre que cette dénomination serait impropre et devra être remplacée par celle de *corps gris*.

Puisque l'on dispose dans une certaine mesure, tant par le choix de la température du corps rayonnant que par celui des sources diversement colorées, de la composition spectrale de la lumière, il importe d'examiner, parmi toutes les radiations qui parviennent à notre œil, quelles sont celles qui jouent un rôle plus ou moins grand dans la vision.

L'œil perçoit les vibrations correspondant environ à une octave comprise entre les longueurs d'onde $0,4\,\mu$ et $0,8\,\mu$. Les radiations qui sont au delà du spectre visible ne nous sont d'aucun secours dans la perception des formes et des couleurs ; elles sont dans la production de la lumière un phénomène parasite nuisible.

Mais, même dans le spectre visible, la sensibilité de l'œil varie énormément avec la longueur d'onde, et les diverses radiations simples sont, par suite, d'une utilité très différente. Les radiations qui sont sur les confins du spectre visible ne contribuent pour ainsi dire pas à la vision des objets qui les émettent.

Le procédé auquel se sont ralliés différents expérimentateurs [1], Macé de Lépinay, Langley, pour évaluer l'importance visuelle des radiations, consiste à déterminer la puissance minima qui est nécessaire dans les diverses couleurs pour permettre de lire les caractères d'une impression fine, par exemple d'une table de logarithmes. Le tableau suivant contient la valeur réciproque de ces puissances, que l'on peut appeler la sensibilité de l'œil pour les diverses radiations.

---

[1] Ch.-Ed. Guillaume, *Revue générale des Sciences*, p. 17 ; 1892.

Longueur d'onde	Sensibilité
0,34 μ	0,003
0,38	0,020
0,40 (violet)	0,128
0,45 (bleu)	2,70
0,50 (vert)	7,58
0,55 (jaune verdâtre)	5,38
0,60	0,95
0,65 (rouge)	0,07
0,70	0,012
0,75	0,00006
0,768 (rouge très sombre)	0,00001

Ces nombres ne doivent être considérés que comme grossièrement approchés, car ils diffèrent beaucoup d'un observateur à l'autre, comme le montrent les trois courbes de la *fig.* 2 qui ont été tracées par trois observateurs différents et se rapportent à la même quantité d'énergie. La différence d'aspect de ces courbes est l'expression du phénomène du daltonisme qui, étudié par ce procédé précis, semble devoir se révéler avec une généralité très grande.

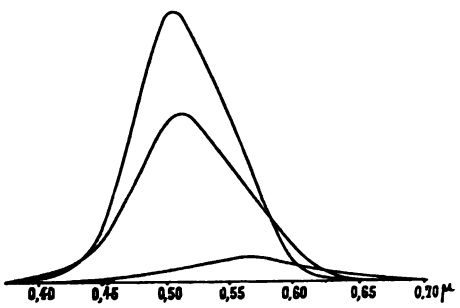

Fig. 2.

Nous sommes arrivés maintenant à un point qui nous permet de définir le rendement lumineux d'une source.

On aurait évidemment une première indication sur l'utilisation de l'énergie rayonnée en déterminant le rapport de l'énergie comprise dans les limites du spectre visible à l'énergie rayonnée totale.

Mais, outre que l'extrémité du spectre visible n'est pas bien déterminée et que la grande intensité qu'ont dans la plupart des sources les radiations situées sur les confins de l'infra-rouge introduirait dans cette évaluation un grand élément d'incertitude, il résulte du tableau ci-dessus que la répartition de l'énergie dans le spectre

visible proprement dit peut changer du tout au tout la valeur éclairante.

Le rendement photogénique, au sens indiqué ci-dessus, est, par exemple, pour :

Un bec Bengel.	0,012
La lampe à arc	0,025

On aura une meilleure image des phénomènes en faisant intervenir dans l'évaluation du rendement chaque radiation simple pour la part avec laquelle elle contribue à la vision, c'est-à-dire en lui attribuant un coefficient égal à la sensibilité relative que l'œil a pour elle, ce coefficient étant pris égal à 1 pour la région de sensibilité maxima et égal à zéro pour les radiations infra-rouges et ultra-violettes. Les sources ont alors, en général, des rendements encore beaucoup plus faibles que ceux que nous venons d'indiquer.

Seul le ver luisant (*Pyrophorus noctilocus*), qui répond merveilleusement aux conditions de bonne utilisation visuelle de la faible quantité de lumière qu'il émet, possède un rendement photogénique brut égal à l'unité, puisque tout son rayonnement est contenu dans le spectre visible, et ce rendement reste encore égal à l'unité quand on fait intervenir les coefficients de sensibilité de l'œil, puisque tout le rayonnement est concentré dans la région verte, où la sensibilité est maxima.

Quelque précieuses que soient les indications que donnent les nombres ci-dessus sur la sensibilité de l'œil aux différentes couleurs, on ne saurait se dissimuler leur valeur toute relative. Si des expériences du même genre faites par un très grand nombre d'observateurs permettaient de mettre en évidence une courbe de sensibilité moyenne, correspondant à une vue normale, on pourrait considérer cette courbe comme *définissant* la valeur éclairante relative de radiations de différentes couleurs. Dans le cas contraire, où il ne résulterait pas des observations une courbe normale, on ne voit pas comment on leur rattacherait légitimement une évaluation numérique du rendement, à moins d'admettre une valeur différente pour chaque observateur.

La complexité de la question résulte bien des recherches de MM. Broca et Sulzer [1], qui ont montré, entre autres, que l'influence

---

[1] *C. R.*, t. CXXXVII, p. 812, 944, 977, 1046; 1903.

de la durée de l'impression lumineuse est différente pour les différentes couleurs. Ces recherches mettent en évidence le rôle important de la fatigue, et l'on peut douter que les propriétés du pourpre rétinien soient telles que la vision, au moyen d'une couleur, soit indépendante de la fatigue causée simultanément par une autre couleur, ou, en d'autres termes, que l'on puisse calculer la sensibilité pour une lumière complexe à partir de la sensibilité pour chacun de ses éléments, comme nous l'avons supposé implicitement.

La question de la comparaison des lumières de différentes compositions spectrales a été résolue d'une manière toute différente, en ce qui concerne le corps noir aux différentes températures, par MM. Lummer et Kurlbaum [1].

Les deux côtés d'un photomètre Lummer et Brodhun étaient éclairés, l'un par la cavité incandescente réalisant le corps noir, portée à une température mesurée par le couple Le Chatelier, et l'autre par un étalon secondaire. L'égalité d'éclairement étant établie au photomètre, on élevait d'une petite quantité la température du corps noir dont l'intensité lumineuse augmentait, mais l'égalité photométrique pouvait être rétablie au moyen d'un secteur tournant d'ouverture variable placé sur le trajet des rayons provenant du corps noir. Cette expérience donne donc, pour la température à laquelle on opère, la valeur de l'accroissement relatif $\frac{\Delta E}{E}$ de l'éclat photométrique, comparé à l'accroissement relatif de la température absolue $\frac{\Delta \theta}{\theta}$.

On a donc en répétant cette mesure pour plusieurs températures :

$$\frac{\Delta E}{E} = f(\theta) \frac{\Delta \theta}{\theta}.$$

Le tableau suivant reproduit les résultats de ces mesures :

	900	1.000	1.100	1.200	1.400	1.600	1.900
$f(\theta)$	30	25	21	19	18	15	14

Il suffit d'intégrer cette équation pour obtenir une échelle des éclats photométriques du corps noir en fonction de sa température.

M. Guillaume a déduit de ces nombres, pour $f(\theta)$, une loi hyper-

(1) *Verhandl. d. deutsch. phys. Gesellsch.*, t. II, p. 89 ; 1900 ; — Ch.-Ed. Guillaume, *Rev. gén. des Sciences*, p. 364 ; 1901.

bolique qui conduit par intégration à l'équation

$$E = AT^3 (T - 650)^7,$$

et, comme la puissance émise obéit à la loi de Stephan, on a pour le rendement lumineux du corps noir l'expression :

$$R = BT^{-1} (T - 650)^7.$$

Cette formule extrêmement remarquable pourra rendre des services dans la discussion de l'influence de l'élévation de température sur le fonctionnement des sources de lumière. Pour ne citer qu'un cas, elle sera très appréciée de tous ceux qui, ayant à tenir compte de petites fluctuations du voltage pendant la mesure photométrique de lampes à incandescence, se sont proposé d'évaluer leur influence. Cette application reproduit si exactement les conditions des expériences de Lummer et Kurlbaum que sa légitimité ne saurait être mise en doute.

Par contre, si l'on envisage le résultat de leurs expériences après intégration, dans lequel l'éclat d'une source d'une certaine couleur est exprimé, semble-t-il, d'une manière rigoureuse par celui d'une source de couleur différente, on doit se demander où se dissimule la définition sans laquelle cette comparaison est impossible et l'on s'aperçoit que chaque opération de mesure à une température déterminée contient en réalité la définition de l'égalité d'éclat pour les radiations infiniment voisines. La définition est donc donnée de proche en proche grâce à la continuité du phénomène.

Mais cette remarque permet de poser la question de la légitimité de cette méthode. Si, partant du même point — corps noir à 900° — pour aboutir au corps noir à 1.900° absolus, on passait par une autre série continue d'intermédiaires, formée par exemple par des sources colorées convenables, arriverait-on à la même valeur pour le rapport des éclats extrêmes?

Ce rapport serait-il en outre le même que celui que l'on pourrait déduire par l'application des sensibilités de Langley ? Il est probable que non, et il n'y aurait plus de *loi;* mais on n'en conserverait pas moins le droit de donner sa préférence à l'échelle des éclats donnée par les expériences de Lummer et Kurlbaum au moyen du corps noir, puisqu'elle constitue une *définition* que l'on est libre de choisir arbitrairement.

Ces expériences suggèrent une autre application à la question qui nous occupe. On pourrait, semble-t-il, les calquer en décrivant l'échelle des éclats non pas en fonction de la température, mais en fonction de la longueur d'onde dans le spectre correspondant à une température déterminée, et refaire ainsi une échelle des sensibilités analogue à celle de Langley.

Enfin, une nouvelle méthode de photométrie hétérochrome, celle du photomètre à scintillement de Simmance-Abbady, nous fournit une solution générale du même problème, c'est-à-dire une nouvelle définition de la valeur éclairante relative des différentes couleurs. Ce sera la tâche des expérimentateurs d'établir si cette définition est vraiment univoque ou si le résultat dépend du mode opératoire, et ensuite jusqu'à quel point elle concorde avec la définition de Langley et celle de Lummer et Kurlbaum [1].

Ouverture de la pupille. — Il reste à mentionner un élément physiologique qui a été fréquemment signalé, mais auquel on n'accorde peut-être pas toujours dans l'estimation pratique de la valeur d'une source lumineuse l'importance qui lui revient. Je veux parler de la grandeur variable de l'ouverture de la pupille. Au grand jour, la pupille se contracte pour ne laisser passer qu'une minime quantité de lumière, tandis que, dans l'obscurité, elle se dilate, et il ne me semble pas impossible que la section du faisceau lumineux pénétrant dans l'œil varie dans le rapport de 1 à 20 [2]. Cette protection automatique de la rétine contre les images trop vives semble déterminée moins par la quantité totale de la lumière qui tombe sur l'œil que par l'éclat spécifique des objets les plus lumineux, c'est-à-dire des sources de lumière elles-mêmes. On peut ainsi expliquer cette sensation que l'on éprouve souvent en comparant un arc nu et le même arc recouvert d'un globe dépoli. Le premier brille plus qu'il n'éclaire, et le second, bien que 30 à 40 0/0 de sa lumière soient absorbés par le diffuseur, fait pénétrer plus de lumière jusqu'à la rétine, grâce à une contraction moindre de la pupille. C'est à l'intervention de ce facteur physiologique que se rattache le grand intérêt de globes diffuseurs de verre cannelé, strié ou quadrillé qui, sans absorption notable,

---

(1) Cette conférence était faite quand je me suis aperçu que ces expériences de Lummer et Kurlbaum se rapportent au platine incandescent, et non au corps noir comme M. Ch.-Ed. Guillaume et moi-même l'avions pensé. Les conclusions générales auxquelles nous arrivons ici n'en sont pas altérées. Voir aussi Eisler, *Electrot. Zeitschr.*, 10 mars 1904.

(2) Lewis, *Ecl. électr.*, 1904.

donnent à la source lumineuse une surface apparente plus grande et qui ont été, à plusieurs reprises, présentés à la Société de Physique. Cet intérêt est indépendant du but que certains de ces diffuseurs poursuivent simultanément, en dirigeant le flux lumineux là où il est utile par une disposition qui rappelle les appareils projecteurs des phares.

Je ne sache pas que des mesures précises aient été faites de l'influence de la contraction de la pupille sur la valeur éclairante des sources. Ce facteur si important est inaccessible au photomètre. Peut-être pourrait-on faire des mesures directes du diamètre de la pupille dans diverses conditions d'éclairage.

Conséquences pratiques des principes. — 1° *Corps noirs.* — Beaucoup de sources lumineuses sont fondées sur l'émission du charbon incandescent, c'est-à-dire d'un corps approximativement noir. Pour celle des sources artificielles dont la température est la plus élevée, pour l'arc électrique, de beaucoup la plus grande partie de la puissance émise est infra-rouge; on voit donc que, pour toutes ces sources, on aura intérêt à *prendre une température aussi élevée que possible pour déplacer le rayonnement de l'infra-rouge dans le spectre visible.*

2° *Sources colorées.* — Restant dans le cas de la radiation thermique en passant aux sources colorées, on voit que celles-ci seront avantageuses ou non suivant que leur pouvoir émissif se rapprochera davantage du pouvoir émissif du radiateur intégral à la même température dans la partie visible ou obscure du spectre. Et comme, en général, la plus grande partie de l'énergie rayonnée se trouve encore dans l'infra-rouge, les corps colorés avantageux sont souvent ceux dont le pouvoir émissif augmente du côté des petites longueurs d'onde.

En général, le rendement lumineux des corps colorés croîtra avec l'élévation de température. Mais on ne peut affirmer pour les corps colorés que cette règle soit sans exception, tant qu'on ne connaîtra pas la variation des pouvoirs émissifs pour toutes les radiations en fonction de la température.

Les données physiques sur ces pouvoirs émissifs que nous possédons sont encore peu nombreuses; mais nous avons, du moins, deux déterminations complètes de puissance rayonnée aux diverses températures, pour le corps noir d'une part et pour le platine poli de l'autre, dues à MM. Lummer et Pringsheim. Nous avons déjà parlé de ces expériences sur les corps noirs.

A première vue, les courbes qui représentent l'émission du platine poli diffèrent peu de celles du corps noir; mais leur étude quantitative montre que l'énergie totale rayonnée n'obéit pas à la loi de Stephan. Elle est plus voisine de la proportionnalité à la cinquième puissance de la température absolue. Ceci peut s'interpréter en disant que le rapport du pouvoir émissif du platine poli à celui du corps noir croît avec la température. Il est, en effet, d'après les expériences de Lummer et Pringsheim :

T. abs.	0/0
372°,8	8,92
492	6,00
654	7,45
795	11,14
1.108	15,25
1.481	17,97

Lummer et Pringsheim ont montré que l'on pouvait représenter le rayonnement du platine poli par la formule du corps noir, de Wien, en remplaçant la température réelle par une température fictive plus élevée, dans le rapport de 1,12, et en réduisant la surface dans un rapport variable avec la température. Cette dernière circonstance n'intervient pas dans les questions de rendement, puisqu'elle affecte dans le même rapport les radiations visibles et invisibles.

M. Guillaume a utilisé cette manière d'exprimer le pouvoir émissif croissant du platine pour en déduire, au moyen de sa formule, le rapport du rendement lumineux du platine poli et celui du corps noir à la même température. Il suffit de le calculer pour θ et $1,12\theta$. A 1.850° abs. on trouve ainsi que le rendement lumineux du platine est 2,37 fois plus grand ; à 2.050 abs., c'est-à-dire au point de fusion du platine, il serait 2,89 fois plus grand que celui du corps noir.

Nous allons maintenant passer en revue les divers systèmes d'éclairage électrique actuellement en usage, en cherchant à établir, chemin faisant, comment leur mode de fonctionnement est en rapport avec les principes que nous venons de rappeler; une étude technique complète dépasserait de beaucoup le cadre de cette conférence.

La lampe à incandescence[1] *à filament de carbone.* — Un filament

[1] Une grande partie des renseignements qui suivent est empruntée à M. Bainville (*Bull. Soc. int. d. Electr.*, t. V, 2e série, p. 363: 1905).

de carbone est porté à l'incandescence dans le vide. On évite ainsi les pertes d'énergie par convection, et le courant électrique fournit voluptueusement l'énergie émise sous forme de radiation. Pour une lampe du type courant, le rendement photogénique brut est de 2.6 O environ, le rendement photogénique réduit est bien inférieur. Dans les premières lampes à incandescence, où le filament était formé d charbon noir mat provenant de la calcination d'un produit végétal, ses propriétés absorbantes étaient voisines de celles du corps noir théorique, et, par suite, ses propriétés émissives de celles du radiateur intégral. Le seul précepte à suivre pour obtenir un rendement photogénique élevé était donc de pousser la température aussi haut que possible, et il semble à première vue que rien ne s'oppose à ce que l'on aille très loin dans cette voie, puisque le point de fusion du carbone est très élevé. En réalité on est arrêté bientôt par un phénomène imprévu : la destruction du filament par évaporation électrique dans le vide. Cette évaporation est un phénomène de projection cathodique, elle a pour effet d'amincir et bientôt de couper le filament à la cathode. Simultanément elle recouvre l'ampoule d'une couche absorbante de charbon qui réduit considérablement le rendement lumineux, comme on font foi les nombres suivants obtenus par M. Bainville en nettoyant des lampes usagées à ampoules noircies et en les faisant fonctionner ensuite dans les mêmes conditions :

Avant nettoyage			Après nettoyage			Absorption pour 100
Volts	Ampères	Bougies	Volts	Ampères	Bougies	
250	0.24	7,7	250	0.24	10,77	20,6
120	1,33	13,1	120	1,33	44	70
125	0,78	22,7	125	0,78	47,86	54

Ces nombres montrent combien, même à défaut de la rupture, la vie utile des lampes est limitée par suite de cette absorption. On est donc conduit à faire un compromis entre l'amélioration du rendement et la prolongation de la durée des lampes, et le régime le plus avantageux dépendra évidemment du rapport entre le prix de la lampe et celui de sa consommation horaire. Une durée de six cents heures peut être considérée comme moyenne. Le tableau suivant montre l'accroissement rapide de l'intensité lumineuse avec le nombre de watts dépensés. Il se rapporte à une lampe de 16 bougies, 110 volts, qui consommerait, sous ce voltage normal, 57 watts. Il montre combien facilement la lampe à incandescence résoudrait le

le calcul de M. Guillaume, un rendement lumineux environ deux fois meilleur, un peu au-dessous de la température de fusion du platine. C'est là, sans doute, le facteur le plus important parmi ceux qui ont fait passer la consommation spécifique des premières lampes, qui était de 6 watts par bougie, à celle des lampes actuelles, qui est environ moitié moindre.

On n'est pas très bien fixé sur la température du filament des lampes à incandescence. D'après H.-F. Weber, elle est de 1.565° à 1.588° et atteint 40° de plus pour les lampes à gros filaments. M. Lechatelier, à l'aide de son pyromètre optique, a trouvé des chiffres bien plus élevés, voisins de 1.800°, et M. Janet, qui a fait des mesures au moyen d'une méthode très ingénieuse fondée sur l'étude du refroidissement d'un filament, a trouvé des chiffres de 1.610° à 1.720° pour des lampes de 16 bougies et 63 volts.

Parmi les nouveautés de ces dernières années on a vu apparaître les lampes à haut voltage, permettant de remplacer dans un réseau donné la tension de 110 volts par celle de 220 volts et de doubler ainsi sa puissance. L'avantage de cette transformation réside uniquement dans la meilleure utilisation du réseau. Les lampes de 220 volts ont, à intensité lumineuse égale, des filaments plus fins que celles de 110 volts et ne peuvent être poussées au même degré ; leur rendement est donc inférieur. M. A. Blondel indique que, tandis que la lampe de 16 bougies sous 110 volts consomme environ 50 à 55 watts, sous 220 volts sa consommation s'élève à 65 et 80 watts. Pour la même raison, à tension égale, les rendements des lampes de 5 à 10 bougies sont inférieurs à celui de la lampe de 16 bougies. A plus forte raison les lampes de 5 bougies et 220 volts par exemple sont-elles d'une réalisation difficile et peu économiques.

Inversement les lampes de grande puissance sont plus avantageuses. M. H.-F. Weber estime que leur température est de 40° plus élevée que celle des lampes courantes. M. Weissmann a cherché à donner à celles-ci les mêmes avantages, en subdivisant la tension de 110 volts, au moyen de petits transformateurs-réducteurs, en 5 fractions de 20 volts environ par lampe ; le diamètre du filament de la lampe de 16 bougies est alors le même que celui d'une lampe de 80 bougies et de 110 volts, et, d'après l'inventeur, le rendement est notablement augmenté. Les membres de la Société de Physique ont eu à plusieurs reprises l'occasion de voir ces lampes en service dans les locaux de la Société. Leur lumière plus blanche est agréable ; mais

la complication résultant de l'adjonction d'un transformateur par groupes de cinq lampes, ou moins, est de nature à opposer des difficultés sérieuses au développement de ce système.

Lampes à incandescence dans le vide à filaments autres que le carbone. — a) Lampe Auer à filament d'osmium. — Après de nombreux essais sur les métaux réfractaires, le Dr Auer von Welsbach, l'inventeur de l'incandescence par le gaz, fixa son choix, pour la construction d'une nouvelle lampe à incandescence électrique, sur l'osmium, l'un des métaux rares du groupe du platine. L'osmium fond vers 2.500°; il n'est pas très abondant, et, pour alimenter une fabrication régulière, l'inventeur est obligé de compter sur le retour à l'usine des lampes mises hors de service.

Le filament d'osmium est très délicat à fabriquer, le métal étant trop cassant pour se prêter au tréfilage. La première opération consiste à isoler l'osmium qui existe dans le résidu insoluble provenant du traitement de la mine de platine. Le métal, obtenu en poudre très fine par la réduction de l'acide osmique, est aggloméré, puis filé à la presse ; les filaments séchés sont calcinés à haute température. On obtient ainsi des fils contenant un mélange d'osmium et de charbon; ces fils sont progressivement amenés au blanc éblouissant par un courant électrique dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau. On obtient, par cette opération, l'oxydation du carbone et celle de l'osmium; mais l'acide osmique, qui est facilement réductible, se détruit et redonne le métal. Après quelque temps de ce traitement, le filament est presque entièrement constitué par de l'osmium pur, mais il est poreux et a une surface rugueuse.

Le filament d'osmium est soudé, à l'arc électrique, sur des attaches en platine.

Comme le filament est mou à la température de l'incandescence, on est obligé de l'ancrer; cet ancrage se fait avec des crochets en oxyde de thorium qui sont fixés à l'extrémité de petites baguettes de verre, soudées elles-mêmes à l'ampoule. Malgré cet ancrage, les filaments, dans les lampes qui ne sont pas suspendues verticalement, s'incurvent; aussi leur donne-t-on généralement la position verticale.

Contrairement à ce qui a lieu pour le filament de charbon, la résistance du filament d'osmium a un coefficient de température positif qui est favorable à la résistance aux variations de tension des réseaux. Ainsi, d'après M. Fritz Blau, une augmentation de tension de 10 0/0 ne produit qu'une augmentation de courant de 6,5 0/0,

au lieu de 12 0/0 que l'on observe dans les lampes à filament de carbone. Il semble toutefois que toutes les lampes faites avec cette dernière matière n'aient pas des propriétés identiques. Des expériences faites récemment au Laboratoire central d'électricité n'ont donné, en effet, qu'un accroissement de l'intensité de 8,5 0/0. Pour la lampe au tantale, que nous décrirons plus loin, l'accroissement de courant est de 9 0/0 pour un accroissement de tension de 10 0/0.

L'augmentation de puissance lumineuse montre encore plus nettement le rôle autorégulateur du coefficient de température positif des fils métalliques; elle serait, pour un accroissement de 10 0/0 du voltage,

De 40 0/0 pour la lampe à l'osmium et pour celle au tantale ;
De 85 0/0 pour la lampe au carbone à 3,2 watts.

En régime normal, la consommation spécifique de la lampe à l'osmium est de 1,8 watt environ par bougie décimale.

Le modèle de 25 bougies Hefner à la tension de 40 volts possède un filament de 280 millimètres de longueur et de $0^{mm},087$ de diamètre. Pour réaliser cette lampe, on a été obligé de partager le filament en deux parties, montées en tension. Malgré cet artifice, les lampes doivent être montées par trois en tension sur les réseaux usuels de 100 à 120 volts, ce qui constitue une gêne appréciable. A d'autres points de vue, la lampe à l'osmium serait la lampe idéale; elle jouit d'une longévité remarquable, avec une constance très grande de rendement, comme cela résulte entre autres des données suivantes que j'emprunte à un certificat de la Reichsanstalt :

Des lampes à l'osmium de 38 volts ont été soumises à une étude qui a duré six cents heures. La consommation de courant de lampes de 30 à 35 bougies (Hefner) a été de 1,28 ampère, d'où l'on déduit une consommation spécifique de 1,58 watt par bougie Hefner (ou de 1,8 watt par bougie décimale) dans une direction perpendiculaire à l'axe de la lampe.

Pour la lampe suspendue on trouve, dans une direction horizontale, une consommation spécifique de 1,4 watt par bougie Hefner, au lieu des 2,5 à 3,5 watts qu'exigent les lampes à filament de charbon. La durée des lampes est supérieure à 1.000 heures. Si l'on excepte une lampe détruite accidentellement après 520 heures, la durée moyenne est de plus de 3.320 heures. Si l'on fixe comme limite de la vie utile le moment où l'intensité lumineuse initiale a baissé

de 20 0/0, aucune des lampes examinées n'a atteint cette limite, la destruction se produisant avant.

b) La lampe au tantale. — MM. Siemens et Halske, guidés probablement par les résultats obtenus avec la lampe Auer à l'osmium, chargèrent M. von Bolton de trouver un métal difficilement fusible et pouvant être étiré en fils très fins.

Après avoir étudié successivement le vanadium et le niobium, M. von Bolton arrêta définitivement son choix au tantale, qui est associé au niobium dans la plupart des minerais de ce métal. Les minerais de tantale et de niobium : les columbites, tantalites, niobites, se rencontrent généralement dans les roches granitiques ; ils sont disséminés à la surface du globe, mais sont tous très rares.

M. von Bolton a trouvé que le tantale est le plus infusible des trois métaux étudiés. C'est aussi celui qui se désagrège le moins facilement par le passage du courant. Le métal est obtenu par la méthode de Berzélius, en réduisant par le sodium ou le potassium le fluotantalate de potassium. La masse métallique obtenue, qui retient de l'hydrogène et de l'oxygène, est fondue dans le vide à plusieurs reprises.

La couleur de ce métal se rapproche de celle du fer. Il est ductile et malléable, peut être laminé en lames de $0^{mm},1$ et étiré en fils très fins. Le fil usité dans les lampes a $0^{mm},05$. Son poids spécifique est de 16,8 ; sa dureté est à peu près celle de l'acier doux et sa ténacité comparable à celle de l'acier ; sa résistance à la traction est de 93 kilogrammes par millimètre carré. Pour le fil très fin, la charge de rupture atteint la valeur de 190 kilogrammes par millimètre carré. Le nombre le plus élevé, à ma connaissance, qui ait été obtenu pour l'acier est de 250 kilogrammes par millimètre carré. La résistance spécifique à la température ordinaire est de 16,5 microhms : cm, c'est-à-dire dix fois celle du cuivre et deux fois celle du platine ; son coefficient de température est 0,003 entre 0° et 100°.

A la température de l'incandescence, la résistivité atteint 83 microhms : cm. Elle croît donc beaucoup plus rapidement que ne décroît celle du carbone. Enfin le tantale se ramollit à une température inférieure de plusieurs centaines de degrés à la température de fusion.

Au rouge sombre, le tantale se combine facilement à l'hydrogène et à l'azote en formant des combinaisons très cassantes.

Avec la première lampe, qui date du 28 janvier 1903, on reconnut que, lorsqu'on pousse la lampe de manière à faire tomber la consommation spécifique au-dessous de 1,5 watt par bougie, la lampe noircit rapidement. Le fil employé dans cette lampe avait $0^{mm},28$ de diamètre, était impur, ainsi qu'il résulte des expériences ultérieures, sa résistivité était à peu près double de celle du métal que l'on fabriqua plus tard.

Fig. 3.

Ce n'est qu'après six mois d'essais qu'on parvint à obtenir le tantale en fils du diamètre de $0^{mm},5$ qui avait été reconnu nécessaire. La *fig.* 3 représente le type adopté actuellement. Le fil, de $0^{mm},05$ et d'une longueur totale de 650 millimètres est supporté par deux séries de crochets de fils de nickel assez forts pour éviter l'échauffement. Chacune de ces séries est disposée en étoile, l'une de douze crochets à la partie supérieure, l'autre de onze crochets à la partie inférieure d'une colonne de verre. Le poids du fil de tantale est de 22 milligrammes, de sorte qu'avec 1 kilogramme on peut faire 45.000 lampes environ.

La fabrication d'une telle lampe, en partant du tantale étiré en

fils de diamètre convenable, est très simple. Si la confection du support à 23 branches est un peu compliquée, par contre il n'y a plus à renforcer le filament ni à le souder aux fils conducteurs : le fil de tantale est simplement pincé dans un petit tube de platine soudé à l'extrémité de chaque fil conducteur.

D'après les renseignements fournis par MM. Siemens et Halske, la lampe au tantale, au régime de 1,5 watt par bougie Hefner (soit 1,7 watt par bougie décimale), a une durée utile de 400 à 600 heures, c'est-à-dire qu'au bout de ce temps sa puissance lumineuse a baissé de 20 0/0. La consommation par bougie décimale est alors de 2,2 watts. Au régime de 1 watt par bougie Hefner (1,14 par bougie décimale), la lampe peut fonctionner plusieurs centaines d'heures ; mais elle noircit rapidement et est plus sensible aux variations de tension. Après cinq heures environ de fonctionnement, le fil de tantale a subi une transformation moléculaire qui a pour effet de réduire la consommation spécifique de 0,2 watt. En même temps il s'est contracté et s'est tordu sur les crochets qui lui servent de support. La résistance à la traction est alors devenue très faible, et cette modification s'accentue avec le temps à tel point qu'il n'est pas prudent de déplacer des lampes qui ont 200 ou 300 heures de service.

Nous reconnaissons dans la recherche de métaux réfractaires qui a guidé le Dr Auer von Welsbach et la maison Siemens et Halske l'influence de nos connaissances sur la composition spectrale de plus en plus favorable de la lumière émise par le corps noir aux températures croissantes. Mais, en outre, plus encore que le filament de charbon à éclat métallique des lampes actuelles, le filament d'osmium et celui de tantale doivent vraisemblablement bénéficier de l'émission sélective avantageuse des métaux polis, en se rapprochant des propriétés du platine, telles qu'elles résultent des expériences de MM. Lummer et Pringsheim. Ce sont donc des sources colorées; mais cette circonstance n'intervient en quelque sorte qu'accessoirement, à côté de la tendance vers une température élevée. Nous allons faire un pas de plus avec la dernière lampe à incandescence qu'il nous reste à décrire.

e) La *lampe Nernst* est fondée sur l'incandescence par le passage du courant électrique d'un bâtonnet composé de divers oxydes terreux. Ces oxydes ne conduisent pas le courant à la température ordinaire, tandis qu'à 600° ils acquièrent une conductibilité de nature électrolytique, qui permet le passage d'un courant suffisant pour entretenir et pousser davantage l'incandescence.

Je cède à la tentation de citer textuellement [1] les termes avec lesquels M. W. Nernst, dans une conférence faite à Gœttingue le 9 mai 1899, donnait connaissance au public scientifique de sa remarquable invention. Cette conférence est intéressante non seulement par l'excellente description qu'elle donne de la lampe nouvelle, mais surtout parce qu'elle nous initie à la marche des idées de l'inventeur. Rendant justice à son précurseur Jablochkoff, M. Nernst nous montre comment il est arrivé indépendamment, par un ensemble de déductions s'appuyant sur une vue claire des conditions physiques de la production de la lumière et sur des connaissances approfondies de chimie physique, à imaginer un système d'éclairage aussi original que plein d'avenir.

« En 1877, Jablochkoff fit breveter une lampe électrique, dans laquelle de petites plaques de kaolin et de substances analogues étaient échauffées par les étincelles d'une bobine d'induction et ensuite portées à l'incandescence par le courant de la bobine.

« Par suite du mauvais rendement de cette lumière et surtout à cause des dangers et des inconvénients des tensions de plusieurs mille volts, cette lampe n'a jamais été en usage; elle est presque totalement oubliée. Aussi me suis-je fait un devoir de parler d'abord de l'essai de Jablochkoff.

« Par la théorie et d'ailleurs sans avoir connaissance du brevet en question, je déduisis qu'on ne pouvait construire des lampes à incandescence d'un bon rendement avec le charbon ou avec d'autres conducteurs métalliques; mais il était possible de les obtenir avec des conducteurs de 2e classe (électrolytes).

« On sait que toute source de lumière, outre les rayons lumineux, émet des rayons calorifiques qui n'ont aucune utilité pour l'éclairage, mais qui consomment inutilement de l'énergie (pour la lumière incandescente ordinaire, 97 0/0 de l'énergie employée; dans l'arc, 90 0/0). Plus on élève la température de la substance éclairante, plus on augmente le rapport de la lumière à la chaleur

« La supériorité du rendement lumineux d'une lampe à arc vient de ce que l'on porte le crayon de charbon à une bien plus haute température que ne le supporte à la longue le filament de la lampe à incandescence. Mais, comme pratiquement on ne pourra guère augmenter la température des lampes électriques, aujourd'hui il y a peu d'espoir d'accroître leur rendement lumineux.

---

[1] Traduction A. E. G.

« On pourrait certainement faire un grand progrès s'il était possible d'employer comme corps incandescent des substances émettant peu de rayons calorifiques et avec lesquelles presque toute l'énergie électrique serait transformée en lumière.

« D'après moi, il est évident qu'il est possible de trouver maintenant de telles substances dans les conducteurs métalliques ou une combinaison de matières métalliques et minérales.

« Tous les corps opaques, d'après le principe absolu de Kirchhoff, émettent plus de rayons calorifiques que lumineux ; ils fournissent, en effet, ce qu'on appelle le spectre normal d'un corps noir. D'ailleurs, d'après la théorie électromagnétique de la lumière, bien établie, il faut que les conducteurs électromagnétiques soient opaques. On ne peut donc construire avec des conducteurs métalliques une lampe très économique (à moins d'opérer à la température de la lampe à arc ou à une température plus élevée encore).

« La production de lumière avec la flamme du gaz présente une certaine analogie avec notre problème. Tant que l'émission de la lumière se faisait uniquement par des molécules de charbon, on éprouvait toujours des pertes par les rayons calorifiques.

« Le remplacement de la flamme du gaz par des substances ne fournissant pas de spectre normal, comme le manchon Auer, fut donc un énorme progrès.

« Je profite de l'occasion qui m'est offerte pour m'élever contre une erreur très répandue ; il faut amener au manchon Auer moins d'énergie qu'aux molécules de charbon pour obtenir une certaine quantité de lumière. Mais, à une température donnée, les molécules de charbon émettent plus de lumière que le tissu Auer, parce que le maximum d'émission en chaleur comme en lumière est fourni par le corps noir de Kirchhoff.

« Le bec Auer supporte beaucoup plus facilement les hautes températures de la flamme que les molécules de charbon, car la proportion de la lumière à la chaleur y est plus favorable. Ainsi le bec Auer est de beaucoup supérieur à la flamme ordinaire du gaz. Je ne puis m'étendre maintenant sur les expériences probantes, à mon avis, que j'ai faites à ce sujet. Mais je puis dire que le problème Auer m'a suggéré des essais qui m'ont conduit à la solution de ma lampe électrique à incandescence.

« Il a donc suffi d'amener le tissu Auer dans la flamme du gaz pour lui donner une très haute température et par suite un très grand

pouvoir éclairant; mais, pour nous, il s'agit toujours d'échauffer par l'énergie électrique la magnésie ou d'autres oxydes analogues.

« Sans la formation d'étincelles et une très haute tension, l'électricité ne peut parcourir ou échauffer ces corps, en raison de leur grand pouvoir d'isolation.

« L'emploi des étincelles de haute tension pour chauffer à blanc des lamelles de corps réfractaires, comme le dit le brevet Jablochkoff, n'est pas utilisable pratiquement. Ceci, nous l'avions déjà constaté; mais on sait qu'à la fusion les oxydes et les électrolytes conduisent très bien l'électricité; mais il est impossible d'opérer avec des corps en fusion.

« La description des solutions solides, faite, il y a quelques années, par Van t'Hoff, fit supposer l'existence d'électrolytes solides ayant un pouvoir conducteur suffisant.

« Par des essais préliminaires, je pus constater que des mélanges d'oxydes, par exemple de magnésie et de kaolin, devenaient de très bons conducteurs à de très hautes températures (*Expérience*).

« Il fallait encore considérer que les électrolytes se décomposent chimiquement par le courant galvanique. Aussi pouvait-on craindre que le même courant qui chauffait à blanc l'électrolyte ne troublât bientôt sa composition chimique. En employant le courant alternatif, j'ai trouvé, comme c'était d'ailleurs à prévoir, l'électrolyse trop faible pour produire des troubles. Enfin, il fut aussi possible de rendre pratiquement nulle l'action électrolytique, bien plus forte, du courant continu.

« Nous ne pouvons pas encore construire une lampe avec des corps isolateurs à froid, car, même après la fermeture du courant, le corps incandescent reste froid, comme tout isolant.

« Mais, si l'on vient à l'échauffer, il devient légèrement conducteur; un faible courant le traverse, et, si l'on continue à élever sa température, le corps incandescent devient un conducteur parfait, et il restera tel pendant tout le temps de la fermeture du courant (*Expérience*).

« *Pour exciter* le corps incandescent, on le chauffera donc préalablement avec une source extérieure de chaleur. Nous construisons ainsi au moyen d'un corps incandescent électrolytique une lampe toujours prête à servir. Par suite de l'incombustibilité complète de l'oxyde, le vide de la lampe ordinaire devient inutile.

« L'échauffement du corps incandescent s'opère très facilement au

moyen d'une allumette (*Expérience*). On obtient ainsi une lampe peu coûteuse, mais pas très commode.

« Un second moyen est la combinaison du corps incandescent et d'un corps échauffeur électrique dont la chaleur est fournie, d'une façon convenable, par la même source que le courant qui traverse le corps incandescent. Nous obtenons ainsi une lampe automatique qui ne fournit la lumière que dix ou vingt secondes après la fermeture du courant. J'ai construit des lampes avec des appareils d'allumage fixes ou mobiles (*Expérience*).

« On pourrait peut-être penser, d'après ces explications et les expériences que j'ai montrées, que toute difficulté est aplanie et que l'on peut se mettre tranquillement à la construction des lampes.

« Je dois avouer qu'il y a un an j'étais aussi de cet avis; j'ignorais alors les obstacles que j'avais encore à vaincre avant de pouvoir livrer au public un appareil fonctionnant à peu près au laboratoire. Quand on a réussi à combler l'abîme profond qui sépare l'idée d'une invention de sa réalisation ou, en s'exprimant autrement, entre la théorie et la pratique, il faut encore parcourir le long et pénible chemin qui va de la pratique du laboratoire à celle de la vie courante. »

Comme le fait remarquer M. Nernst, les difficultés à surmonter étaient grandes dans les étapes successives de l'invention et l'on peut admirer sans réserve les trésors d'ingéniosité qui ont été dépensés pour mettre la lampe au point.

Malheureusement le public ne put s'habituer à l'idée d'allumer une lampe électrique avec une allumette ; il fallut donc adjoindre à chaque lampe l'appareil de chauffage électrique formé d'une petite spirale de platine noyée dans du kaolin. Un mécanisme électromagnétique coupe le circuit de l'appareil d'allumage lorsque le filament entre en fonction.

L'étude des propriétés du bâtonnet d'oxydes montra qu'une certaine tension minima est nécessaire pour conserver à l'état conducteur et incandescent le filament rendu conducteur par une source de chaleur extérieure. Au-dessous de cette tension le bâtonnet s'éteint. Au-dessus, le courant augmente d'intensité avec la tension, d'abord lentement, puis de plus en plus vite, et, pour une certaine valeur critique de la tension, le régime devient instable, le courant continuant à croître jusqu'à la destruction de la lampe sans nouvel accroissement de tension. Dans la figure ci-jointe (*fig.* 4), la courbe I représente la

caractéristique du filament, c'est-à-dire la relation entre l'intensité du courant et la tension correspondante. Le régime devient instable au point M, où la tension est maximum. Dans l'exemple choisi, ce maximum était de 200 volts. Comme dans les lampes à arc, on combat cette instabilité en ajoutant, en série avec la lampe, une résistance. Mais, pour réduire la consommation dans cette résistance tout en la rendant très efficace, il importe qu'elle ait un accroissement thermique

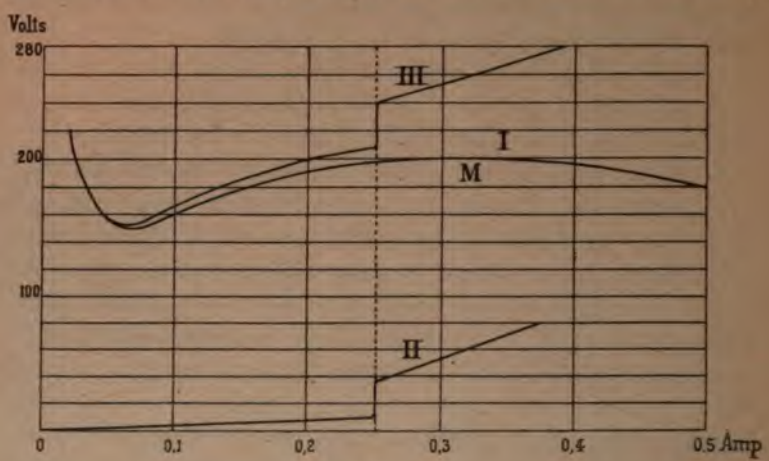

Fig. 4.

considérable. Le fer, indépendamment de son accroissement thermique en fonction de la température, possède la propriété de tripler brusquement de résistance à la température de son premier point de transformation au rouge naissant. La courbe II de la figure représente la caractéristique d'un fil de fer fin, que l'on enferme, pour le préserver de l'oxydation, dans une ampoule remplie d'hydrogène. Cette résistance absorbe, au-dessous du point de transformation, environ 15 volts pour un courant de 0,25 ampère, et 40 volts environ pour une intensité de courant extrêmement peu supérieure à celle-ci. La courbe III, la caractéristique résultante du système, obtenue par l'addition des ordonnées des courbes I et II, montre comment le résultat cherché a été obtenu par la suppression du maximum, cause de l'instabilité du régime.

Le schéma et la légende ci-dessous, empruntés au constructeur, montrent les principales dispositions d'un des modèles de cette lampe.

« Le filament *f* et la spirale de chauffage *c* sont adaptés sur une palette en porcelaine P pourvue de trois pièces de contact : les deux douilles *a* et *b* et la pièce plate en laiton *g* munie d'une vis de serrage. L'ensemble de ces pièces constitue le *brûleur*.

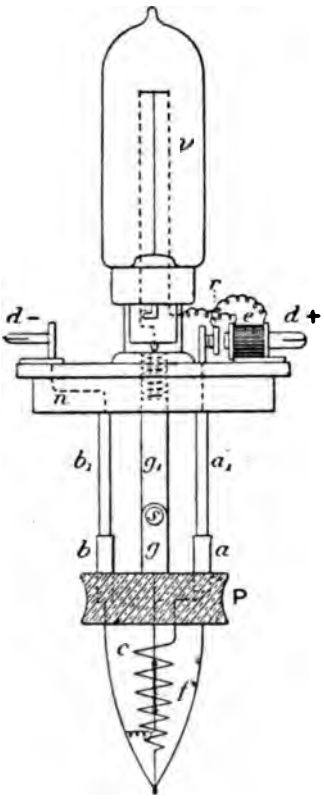

Fig. 5.

« Ces parties correspondent aux pièces a_1, b_1, g_1 de la lampe proprement dite. Le brûleur est adapté sur la lampe et immobilisé par le serrage de la vis *s*. L'appareil de chauffage se compose d'une spirale en porcelaine sur les spires de laquelle est enroulé un fil de platine très fin.

« L'interruption du courant de chauffage est obtenue par l'électro-aimant *e*.

« La résistance *v*, en fer, est adaptée sur la lampe par une petite

douille à baïonnette analogue à celle employée pour les lampes à incandescence ordinaires.

« Le courant est amené à la lampe par la broche *d* +. Ce courant passe dans la lame à ressort de l'électro-aimant, traverse par la broche *a* la spirale de chauffage *c* et passe par la canalisation *n* à la broche *d* —. Dès que le circuit est fermé, la spirale de chauffage devient rouge sombre.

« Dès que le filament a atteint la température à partir de laquelle il devient conducteur, le courant passe de la broche *d* + dans la bobine de l'électro-aimant *e*, dans la résistance *v*, le contact *g*, le filament *f*, et revient par la broche *d* — à la canalisation. »

Quand le courant qui traverse l'enroulement de l'électro-aimant a atteint l'intensité suffisante, le contact à ressort est attiré et le courant de chauffage est coupé en *r*.

Il n'a pas été possible de construire une lampe fondée sur l'emploi de conducteurs électrolytiques fonctionnant dans le vide, ce qui eût encore élevé le rendement lumineux déjà très bon de la lampe Nernst. Elle fonctionne donc à l'air atmosphérique, simplement protégée par un globe de verre, et l'énergie fournie par le courant est perdue par convection et par rayonnement. Et si, malgré cette infériorité, elle atteint les rendements des lampes au tantale et à l'osmium, cela ne peut être que grâce à une solution tout à fait remarquable du problème de l'émission lumineuse.

La durée moyenne de la lampe Nernst est de 400 à 700 heures ; mais le brûleur, composé du filament et de la spirale de chauffage, est indépendant du reste de la lampe et doit seul être remplacé. La consommation spécifique augmente avec le temps. Je transcris ici le résultat d'un essai fait par la Reichsanstalt sur 6 lampes de 1 ampère et 220 volts.

	Intensité lumineuse en bougies Hefner	Watts par bougie Hefner
Au début.	153,2	1,54
Après 50 heures.	137,2	1,66
— 100 —	137,8	1,67
— 200 —	137,8	1,65
— 300 —	138,8	1,57
Moyenne	139,1	1,63

M. Nernst nous a dit le rôle important joué par le bec Auer dans

la marche de ses idées. Rappelons en quelques mots en quoi consiste ce que l'on pourrait appeler le problème du bec Auer [1].

Les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet en vue d'améliorer la qualité des manchons ont montré qu'il était avantageux d'avoir recours à un mélange de deux oxydes en proportion déterminée. A l'un des oxydes employés en grande quantité et qui joue le rôle de support, on ajoute un second oxyde en proportion minime (0,5 à 2 0/0).

Chose curieuse, chacun des deux corps ne semble présenter seul aucune aptitude à produire de la lumière. Dans le mélange le plus généralement employé, l'oxyde support est la thorine à la dose de 98,7 0/0, l'oxyde radiant est la cérite à la dose de 1,3 0/0. Les intensités lumineuses de trois manchons faits respectivement en thorine, cérite et mélange, et fonctionnant sur un même brûleur dépensant 100 litres à l'heure, sont :

Manchon de thorine	1	bougie
— cérite	7	—
— mélange	70	—

Des résultats analogues ont été obtenus par le mélange approprié d'alumine et d'oxyde de chrome, très employé en Angleterre (bec Sunlight).

M. Bunte suppose que chaque parcelle de cérite active la combustion de la flamme par un effet catalytique et est cause d'une élévation locale de température extrêmement considérable, la thorine jouant le rôle d'isolant thermique. Cette explication très ingénieuse est en contradiction avec une expérience de MM. Lechatelier et Boudouard, qui ont montré que l'éclat de la matière des manchons est le même dans la flamme et quand elle est portée à la même température en dehors de la flamme. Nous allons voir qu'elle n'est pas nécessaire. Les mêmes physiciens ont montré que le pouvoir émissif du mélange Auer à 1.300° environ croît plus vite du côté plus réfrangible du spectre que celui du platine poli à la même température. Ce mélange constitue donc une source colorée plus avantageuse que le

---

(1) Voir Ch. Fery, *Etude du rayonnement de quelques oxydes* (*Bull. Soc. franç. de Phys.*, 19 janvier 1903) ; — Ch.-Ed. Guillaume, *Rev. gén. d. Sciences*, p. 422 ; 1901. — Le travail de M. Rubens sur le même sujet, communiqué depuis à la *Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte*, Meran, 1905, n'était pas encore paru.

platine, qui a déjà, à la température des lampes à incandescence, un rendement de plus du double de celui du radiateur intégral. C'est là l'une des raisons du rendement lumineux élevé du bec Auer. Signalons une autre circonstance qui peut aussi avoir son importance et qui résulte nettement de l'étude de M. Féry. M. Guillaume (*loc. cit.*) avait déjà montré que la température d'un fil de platine, même très fin, n'est pas celle de la flamme dans laquelle il est plongé, mais inférieure et déterminée par l'équilibre entre la chaleur qui lui est amenée des gaz chauds par convection et celle qui en est enlevée par l'émission. La température d'un corps plongé dans une flamme sera donc d'autant plus élevée que son pouvoir émissif sera plus faible. Le pouvoir émissif du thorium est très faible, et sa température doit en conséquence être très élevée. Mais cela ne suffit pas, car l'effet de la température élevée peut être compensé par une coloration défavorable. L'addition d'une petite quantité de cérite change la coloration de la source et explique l'excellence des résultats obtenus. M. Féry montre en effet que le manchon est très absorbant pour les rayons lumineux quand il est porté à haute température et se rapproche ainsi par ses propriétés de celles du corps noir pour *les radiations auxquelles l'œil est sensible*. On me pardonnera cette digression qui, me semble-t-il, met bien en évidence l'intervention des lois de l'émission lumineuse dans la résolution des problèmes de l'éclairage.

Dans la lampe Nernst, le problème est différent en ce que la difficulté de l'apport d'énergie en quantité suffisante pour l'obtention de la température élevée n'existe pas. Par contre, elle exige une résistance plus grande à l'altération mécanique du corps incandescent, dont la moindre fêlure trouble le fonctionnement de la lampe. La solution pratique sera donc différente, mais la méthode mise en œuvre sera la même et consiste dans le choix et le dosage convenable des éléments constitutifs du corps incandescent. Aussi bien les descriptions récentes mentionnent-elles des bâtonnets composés de thorine, de cérite, de zircone et d'yttria à la place de la magnésie et du kaolin dont il était d'abord question.

Nous ne nous arrêterons pas à la *lampe à arc* ordinaire, on connaît ses avantages : sa belle lumière blanche et sa consommation spécifique faible, que l'on peut évaluer comme étant industriellement égale à 0,6 à 0,7 watt par bougie décimale pour les arcs à courant continu de 300 à 1.500 watts. Ce bon rendement tient à la température élevée des charbons, que des déterminations concordantes de

diverses origines nous enseignent être voisine de 3.500°. La loi du déplacement de Wien nous apprend en effet que le produit

$$\lambda_m \theta = C^{te},$$

où λ_m est la longueur d'onde du maximum de $\frac{\partial P}{\partial \lambda}$ (Voir p. 270) et θ la température absolue.

λ_m étant exprimé en microns et θ en degrés centigrades, la valeur de cette constante est 2.900, et par suite :

$$\lambda_m = \frac{2900}{3773} = 0,77.$$

Le maximum de puissance du radiateur intégral ayant la température de l'arc se trouve donc dans le spectre visible, tandis que, pour toutes les autres sources artificielles, il se trouve dans l'infra-rouge.

Dans l'arc, les charbons s'oxydent librement à l'air. Il est résulté de la tentative d'éviter cette usure en empêchant le libre accès de l'air atmosphérique une lampe nouvelle, « l'*arc en globe clos* ou arc enfermé », qui a des propriétés nettement différentes de celles de l'arc ordinaire [1].

L'insuccès des premières tentatives faites dans cette voie provenait de ce que les inventeurs cherchaient simplement à mettre à l'abri de l'air un arc ordinaire. Dans ces conditions, le récipient se couvrait rapidement d'une couche opaque de poussière de charbon. C'est en 1894 seulement qu'a paru l'arc enfermé moderne, qui est caractérisé par l'emploi d'un arc très allongé fonctionnant sous une tension de 75 à 80 volts, double de la tension ordinaire, dans une enceinte imparfaitement close.

La lampe de M. Marks, ou celle de M. Jandus, consiste en principe en un arc voltaïque enfermé dans un double globe, dont le second, fermé par un obturateur de forme spéciale, permet la dilatation de l'air sous l'action de la chaleur développée par l'arc et ne permet qu'un échange très faible entre les atmosphères intérieure et extérieure. Le grand globe extérieur, fermé par une soupape, constitue lui-même une seconde enceinte préservatrice qui se remplit de gaz brûlés dans le petit globe. La combustion des charbons

[1] Voir A. Blondel, *Rapp. Congr. d'Électr.*, p. 224 (1900), que je cite presque textuellement.

placés dans ces conditions est extrêmement retardée et leur renouvellement ne se fait que toutes les 150 ou 200 heures.

L'arc obtenu dans le mélange de gaz peu favorables à la combustion présente un aspect tout spécial : le charbon positif supérieur est à peine creusé ; parce que l'arc tourne constamment autour de son extrémité, le charbon négatif inférieur est presque plan ; leur distance normale est d'environ 8 millimètres pour un arc de 80 volts.

Les avantages des arcs enfermés sont : l'indépendance des foyers, leur montage sur 110 volts, ou par paire en série sur 220 volts, l'extrême simplicité du mécanisme, la consommation très réduite de charbon, la réduction de la main-d'œuvre. Leurs inconvénients sont la teinte bleue de la lumière, les variations d'éclat et le rendement médiocre.

En effet, d'après MM. A. Blondel et Jigouzo, le rendement de l'arc enfermé n'est que les 2/3 environ de celui de l'arc ordinaire de même puissance.

Par le voltage élevé sous lequel elle fonctionne, 80 volts aux bornes, 108 à 120 volts en y comprenant la chute de tension dans la résistance de réglage, la lampe Liliput, mise récemment dans le commerce par la maison Siemens et Halske, se rapproche des arcs enfermés. Elle semble être une solution heureuse du problème souvent abordé de l'arc de faible puissance. Ses propriétés sont résumées dans le tableau suivant :

Intensité	Voltage aux bornes	Durée des charbons	Intensité hémisphérique avec un globe albâtre	Puissance par bougie aux bornes de la lampe
2 ampères	80 volts	16 à 20 heures	130 b. Hefner	1,2 watt
3 —	80 —	12 à 14 —	350 —	0,7 —

Cette lampe est donc destinée à entrer en concurrence moins avec les arcs ordinaires qu'avec la lampe Nernst, dont elle possède à peu près la puissance et le rendement.

Arcs-flammes. — L'arc électrique a bénéficié ces dernières années du courant d'idées conduisant à la substitution des sources colorées aux sources noires. Reprenant une idée déjà ancienne, mise en valeur par Jablochkoff en 1876, et consistant à volatiliser dans l'arc des oxydes alcalino-terreux, *Bremer* incorpora dans les charbons de lampes à arc, qui ont figuré à l'Exposition de 1900, de la chaux, de la strontiane et de la magnésie dans des proportions de 20 à 50 0/0. Le fluorure de calcium paraît particulièrement avantageux. En va-

riant la composition des charbons, on obtient à volonté des lumières rougeâtre, orangée, jaune d'or ou blanche, et il semble que ce soit la lumière jaune, dans laquelle prédomine le spectre du calcium, qui soit la plus économique. Des additions convenables de fondants ont pour effet de débarrasser les charbons de scories gênantes. La physionomie caractéristique de cet arc consiste en ce que, tandis que dans l'arc ordinaire les charbons fournissent la presque totalité de la lumière, l'arc proprement dit n'en fournissant souvent que 5 0/0, ici l'arc contribue pour une part importante à l'intensité totale. Il en résulte que l'on peut allonger l'arc sans craindre de diminuer trop son rendement et le faire fonctionner sous les voltages les plus divers. En présence des nombres très différents donnés par les différents auteurs, il est difficile d'indiquer une consommation spécifique. On rencontre des nombres descendant jusque dans le voisinage de 0,1 à 0,2 watt par bougie Hefner *hémisphérique* moyenne. Mais il semble bien qu'on n'exagérera pas la portée économique de ce nouveau système en évaluant qu'il donne la même quantité de lumière pour moitié moins d'énergie que l'arc ordinaire, soit environ 0,3 watt par bougie. L'arc à flamme bat donc actuellement le record de la consommation spécifique. Autre chose est d'apprécier l'agrément et la valeur artistique de ces lumières fortement colorées encore peu répandues chez nous.

Nous avons vu qu'il n'était nécessaire, ni pour la lampe Nernst, ni pour le bec Auer, d'invoquer les phénomènes de luminescence, comme on a cherché à le faire quelquefois pour expliquer leur rendement élevé. Les propriétés du rayonnement thermique et celles des sources colorées y suffisent. Il est plus malaisé de distinguer dans les arcs-flammes quelle est la part du phénomène purement thermique et dans quelle mesure, par le passage du courant à travers les gaz incandescents, il y a production de lumière aux dépens du travail électrique, sans mettre à contribution le réservoir calorifique formé par le corps rayonnant.

Avec l'*arc au mercure* de Cooper Hewitt, nous quittons le domaine de l'émission thermique, intégrale ou colorée, pour entrer dans celui de la luminescence. Cette source, employée par Arons d'abord, puis par plusieurs autres physiciens, dans des recherches scientifiques, a été étudiée en Amérique, dès 1898, par Cooper Hewitt en vue des applications à l'éclairage. L'arc jaillit entre une électrode négative de mercure et une électrode positive de fer dans un tube parfaitement

vide d'air. La colonne lumineuse remplit tout le tube et n'émet guère que trois radiations dans le spectre visible, une radiation jaune orangé, une radiation verte et une radiation violette. La lampe à arc au mercure a donc un grave inconvénient, elle supprime complètement la vision des objets rouges, qui paraissent noirs. Il y a bien des cas où il importe de voir les objets sans qu'il y ait nécessité à reconnaître les couleurs qu'ils auraient à la lumière du jour. La lumière de l'arc au mercure, qui ne fatigue pas la vue, est d'un usage excellent dans les chantiers, dans certains ateliers. Mais, quand il est nécessaire de voir même approximativement les couleurs, il faut ajouter, par exemple au moyen de lampes à incandescence ordinaires, les radiations rouges qui font défaut. Une gaze colorée avec de la rhodamine, substance fluorescente rouge, qui recouvre la lampe, permet d'obtenir un résultat analogue en transformant en radiations rouges une partie des radiations visibles et ultra-violettes. La perte de lumière que l'emploi de ce palliatif entraîne est de 25 0/0.

Les arcs du modèle actuel, de plus de 1 mètre de longueur, fonctionnent avec 3,5 ampères sous 110 volts. Cooper Hewitt a trouvé que l'on obtenait le rendement optimum quand la température était dans le voisinage de 140°. A cette température, la pression maxima de la vapeur de mercure est de 3 millimètres environ.

M. Maurice Leblanc, dans une conférence faite devant la Société française de Physique, le 29 avril 1905, a donné une description très complète des propriétés physiques de l'arc au mercure et de ses applications; cette circonstance me dispensera d'entrer ici dans plus de détails; je rappellerai seulement que la consommation spécifique est faible, environ 0,43 watt par bougie, chiffre qu'il convient d'accueillir plus que tout autre avec les réserves que commandent les difficultés de la photométrie hétérochrome.

A la température de l'arc au mercure, l'émission thermique du corps noir et de tous les corps colorés est entièrement infra-rouge et bien loin du spectre visible. Le rayonnement ne peut donc se faire que directement aux dépens de l'énergie électrique. Ce fait a son importance : avant l'application de l'arc au mercure, on avait cherché à plusieurs reprises à utiliser les phénomènes de luminescence dans les tubes à gaz raréfié en vue de l'éclairage. On se souvient des tentatives de Tesla et tous les laboratoires possèdent les appareils pour la lumière froide de Moore; mais aucun commencement de

succès n'avait autorisé jusqu'à présent à attribuer à ces tentatives un caractère pratique.

Avec l'arc au mercure, les phénomènes de luminescence entrent dans le domaine industriel et y prennent une place importante. Et en même temps tombent les barrières théoriques que les lois physiques du rayonnement opposaient à la production économique de la lumière.

Pour l'emploi de phénomènes analogues à celui de l'arc au mercure, l'apport de l'énergie sous forme de travail écarte les restrictions que la thermodynamique pourrait apporter à sa transformation en énergie de radiation d'une longueur d'onde déterminée : car le travail est équivalent à de la chaleur provenant d'une source de température aussi élevée qu'on pourra l'imaginer. Quand les lois des phénomènes de luminescence seront mieux connues, il est probable qu'elles traceront à leur tour des limites aux applications possibles ; mais ces limites seront autres que celles du rayonnement thermique, et l'exemple de l'arc au mercure est là pour dire qu'elles ne seront pas étroites.

C'est donc du côté de la luminescence que les chercheurs doivent diriger leurs efforts.

ÉTAT ACTUEL DE LA TÉLÉPHONIE [1]:

Par M. G. de la Touanne.

L'extraordinaire développement de la téléphonie et la multiplicité des problèmes pratiques déjà résolus soit pour les petits, soit pour les grands réseaux, dans l'agencement des postes privés, l'installation des bureaux centraux, la construction des lignes et l'exploitation rendent impossible l'exposé complet, en une heure et demie ou deux heures, de l'état actuel de cette industrie. Grâce à la grande obligeance de hauts fonctionnaires étrangers et au très amical concours de M. l'ingénieur H.-L. Webb, qui ont bien voulu me prêter pour cette conférence de fort intéressants clichés, j'essaierai néanmoins de vous en donner une idée juste et de vous en mettre sous les yeux les caractéristiques principales, recueillies un peu partout : sauf peut-être en un ou deux cas, aucune entreprise privée ni publique ne s'est trouvée, jusqu'à une date récente, assez riche pour doter une région importante d'un système homogène en accord avec tous les progrès acquis ; tel détail a donc été enregistré à un endroit et tel autre l'a été ailleurs : ce qui va suivre vous fera percevoir, je l'espère, l'importance de l'outillage et la somme d'efforts mis en jeu.

Poste d'abonné. — Microphone. — L'idée généralement assez rudimentaire qu'on se forme de la téléphonie est basée la plupart du temps sur la simple connaissance du poste d'abonné : or, au fur et à mesure que les procédés se perfectionnent, le poste d'abonné et la manœuvre de ce poste se simplifient, tandis que se complique le bureau central où sont transférés tous les organes délicats ou soumis à une usure appréciable. En fait, la notion prise du service par la vue d'un poste apparemment de plus en plus simple tend à devenir de plus en plus fausse.

Au début de la téléphonie, bon nombre d'entre vous se le rappellent, — et nous avons du reste encore dans les réseaux secondaires de nombreux exemples de cette disposition, — microphone transmetteur et téléphones récepteurs étaient, au poste d'abonné, accompagnés d'une pile pour l'appel, d'une pile pour la conversation et d'une son-

---

[1] Conférence faite le 16 juin 1905.

nerie indépendante, le tout relié par pas mal de fils, assez encombrant et, semblait-t-il, peu facile à simplifier. Il faut en effet pouvoir appeler son correspondant (pile d'appel), être appelé par lui (sonnerie), lui parler (microphone) et l'entendre (téléphone). Rapidement néanmoins l'usage se répandit de grouper sur un même socle la sonnerie et le microphone; puis la pile d'appel fut remplacée par une petite machine magnéto-électrique genre Siemens, et des arrangements spéciaux permirent (*fig.* 1) de fixer sur le socle le poste entier, microphone M muni naturellement de son crochet commutateur ordinaire et du téléphone T, sonnerie S et machine magnéto-électrique *m* dans la même boîte, et pile de microphone P. C'est, avec des variantes inévitables dans le détail, le groupement généralement adopté aujourd'hui dans le monde pour les postes appartenant à de petits réseaux ou à des réseaux secondaires. Dans les grands réseaux, la simplification est poussée plus loin encore : machine magnéto et pile de microphone ont disparu; tout ce qu'on voit (*fig.* 2), c'est un microphone d'aspect réduit, un ou deux téléphones et le ou les timbres d'une sonnerie.

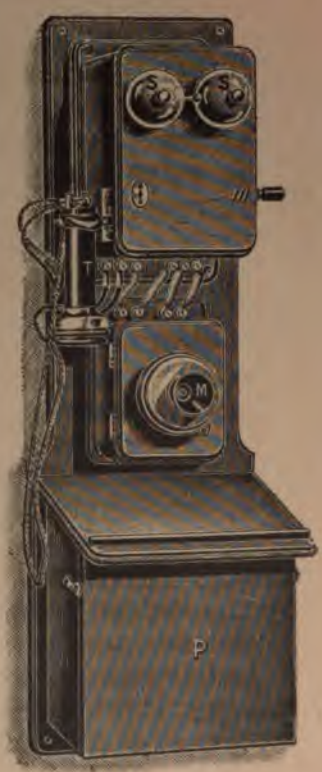

Fig. 1.

Le microphone, du reste, a changé de nature. Les meilleurs transmetteurs de jadis, tels que le microphone Crossley, le microphone Ader, le microphone d'Arsonval, étaient dérivés du microphone de Hughes à crayons de charbon (*fig.* 3). Les microphones modernes, ceux qui permettent de communiquer à 1.500 et 2.000 kilomètres, sont dérivés du microphone à grains de charbon breveté en Angleterre en 1878 [1] par le pasteur irlandais Henry Hunnings et consistant

[1] Provisional specification *Transmitters for telephones* sealed the 24th december 1878, and listed the 16th september 1878, n° 3647.

essentiellement en deux plaques conductrices parallèles, l'une rigide, l'autre flexible, électriquement reliées par du charbon de cornue en menus morceaux ; si l'on parle devant la plaque flexible, celle-ci, par les mouvements vibratoires qu'elle prend, détermine dans la masse

Fig. 2.

granulaire placée derrière elle des variations de compression qui font nécessairement varier les surfaces de contact entre les grains et se traduisent par des variations de résistance de l'ensemble : un courant passant à travers cette masse subit des variations d'intensité, et si ces variations sont suffisamment rapides, comme c'est le cas

lorsqu'elles sont déterminées par les ondes sonores, devient capable d'actionner un téléphone soit directement, soit à travers une bobine d'induction ; le principe est fort simple. Étudié, perfectionné, mis au point, le microphone à grains sous diverses formes se substitue partout graduellement au microphone à crayons. Mais j'ai le devoir de rappeler ici que, si la demande de brevet anglais de Hunnings a été déposée le 16 septembre 1878, M. Charles Bourseul, alors fonctionnaire de l'Administration française des Télégraphes, qui déjà, en 1854, avait eu la prescience du téléphone magnétique et avait affirmé sa croyance dans la possibilité de transmettre électriquement la parole [1], présentait à notre Société, dans la séance du 20 décembre 1878 [2], un microphone à « poudre de coke compris entre deux feuilles de placage de frêne munies au centre d'un contact de charbon de cornue à 2 ou 3 millimètres l'un de l'autre », et dont le principe était par conséquent tout à fait semblable à celui du microphone de Hunnings qu'il ne pouvait connaître à ce moment.

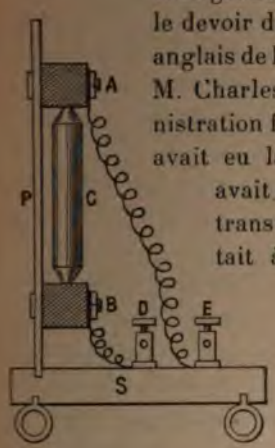

Fig. 3.

Revenons au poste d'abonné : comment va-t-on s'en servir ? Pour obtenir une communication et mener à bien une conversation, nous devions autrefois, et nous devons encore dans nombre de réseaux dont l'importance ne justifie pas et, toute difficulté financière mise de côté, ne justifiera peut-être jamais l'équipement avec du matériel comportant les derniers perfectionnements, sonner en poussant un bouton d'appel ou en tournant la manivelle d'une machine magnéto, décrocher ensuite le téléphone pour le porter à l'oreille et demander le correspondant, puis, la conversation terminée et le téléphone raccroché, sonner à nouveau pour faire rompre la connexion entre notre ligne et celle du demandé. Dans le poste d'abonné des grands réseaux modernes, nous avons vu tout à l'heure qu'il n'existait plus ni pile, ni bouton d'appel, ni machine magnéto ; les appels vers le poste central paraissent donc supprimés. En réalité ils ne le sont pas ; mais l'émission des signaux, demande ou fin de conversation, est devenue

---

(1) *Illustration*, 26 août 1854, p. 139 ; — *Annales télégraphiques*, 1877, p. 167.
(2) *Séances de la Société française de Physique*, 1878, p. 200 et p. 201.

automatique, et l'abonné désirant une communication n'a plus, enlevant le téléphone du crochet, qu'à le porter à l'oreille, demander la communication et, une fois la conversation terminée, raccrocher le téléphone. Telle est l'ingéniosité des dispositifs adoptés que, pendant ce temps et sans autre intervention de l'abonné, le poste central a successivement reçu un signal d'appel, constaté la correspondance des deux intéressés et saisi l'achèvement de la conversation. C'est ce qu'on appelle les systèmes à batterie centrale, parce que, entre autres particularités, on y trouve tout ce qui est pile ou accumulateur rassemblé au poste central, sans qu'il en reste rien dans les postes d'abonnés.

Soit pour les réseaux petits ou moyens, soit pour les grands réseaux bien équipés, nous voici donc conduits à examiner le poste central.

Poste central. — Pour établir l'intercommunication entre les lignes aboutissant au poste central, les commutateurs suisses usités en télégraphie furent naturellement employés les premiers, toutes les lignes d'abonnés, alors unifilaires, aboutissant à des barres verticales disposées dans un même plan et des barres horizontales dans un plan parallèle, à petite distance des premières, servant avec l'aide de fiches à relier entre elles deux lignes d'abonnés quelconques : des dispositions supplémentaires étaient prises pour le signalement des appels et des fins de conversation. Mais, destiné à relier un abonné appelant quelconque avec un quelconque de ses coabonnés, le poste central doit assurer entre les divers circuits y aboutissant toutes les combinaisons deux à deux ou plutôt tous les arrangements deux à deux de ces circuits, et le nombre en croît vite; de 2 pour 2 postes et de 12 pour 4, il est déjà de 9.900 pour 100 abonnés ; quand on arrive à 10.000, il atteint 100 millions ou peut s'en faut. Or le plus grand commutateur suisse qui ait été construit à ma connaissance l'a été pour les besoins télégraphiques de l'Administration belge et ne dépassait pas une capacité de 200 lignes. Vous sentez qu'au fur et à mesure du développement de la téléphonie il a fallu combiner d'autres commutateurs que les commutateurs suisses du début, bien loin du reste de cette capacité de 200.

Successivement on vit apparaître les systèmes du genre de celui, très remarquable pour l'époque, que présentait la Société générale des Téléphones à l'Exposition d'Électricité qui eut lieu à Paris en 1881, les commutateurs « Standard », dont le premier mis en service en Europe fut acheté par l'Administration suisse des Télé-

graphes à cette même exposition du Palais de l'Industrie de 1881, et plus tard les commutateurs multiples dans leurs diverses transformations. A propos des tableaux commutateurs de la Société générale des Téléphones, je vous rappellerai que pendant longtemps la caractéristique principale du réseau de Paris, ce qui le différencia de tous les réseaux du monde, fut l'emploi des lignes bifilaires [1] ; les circuits entièrement métalliques y furent en effet adoptés dès l'origine à la suite des travaux d'une commission mixte comprenant les représentants de la Société et les ingénieurs de l'Administration des Télégraphes : ce sont les tableaux commutateurs bifilaires de ce réseau qui étaient au Palais de l'Industrie ; aujourd'hui la nécessité des lignes bifilaires pour assurer une conversation correcte et aisée n'est plus contestée nulle part. Nous reviendrons sans doute sur ce point.

Les commutateurs genre « standard » forment actuellement l'outillage partout adopté en principe pour les petits réseaux ou les réseaux secondaires; d'autre part, les multiples qui forment celui des grands bureaux centraux constituent le développement logique de ce même appareil; à ce double point de vue, il y a lieu de noter les dispositions essentielles et la manœuvre du « standard ». Sur un panneau vertical (*fig.* 4) sont disposés : 1° à la partie inférieure CDEF, l'ensemble des *jacks*, c'est-à-dire des parties terminales des lignes (dans les standards, les jacks apparaissent simplement sur le panneau sous forme de petits anneaux, de petites bagues en laiton); 2° à la partie supérieure ABCD, une rangée d'annonciateurs de fin de conversation et au-dessus les annonciateurs d'appel [2]. Jacks et annonciateurs d'appel sont numérotés, le jack et l'annonciateur de même numéro correspondant à la même ligne d'abonné. Une tablette horizontale IKL supporte des fiches *f*, *f'* disposées deux par deux l'une devant l'autre et prolongées par des cordons ; ceux-ci, composés de fils conducteurs enveloppés de coton ou de soie, pendent sous la tablette et le panneau ; en avant de chaque paire de fiches et relié à elles à travers les cordons est disposé un jeu

---

[1] La seconde caractéristique fut la disposition des électro-aimants d'annonciateurs *en dérivation* entre les deux fils du circuit et non pas en embrochage, selon le terme usité, sur les fils eux-mêmes.

[2] Dans la figure, les annonciateurs de fin de conversation sont disposés suivant la bande EFGH, au-dessous de la région des jacks ; mais ce n'est pas là l'agencement généralement adopté.

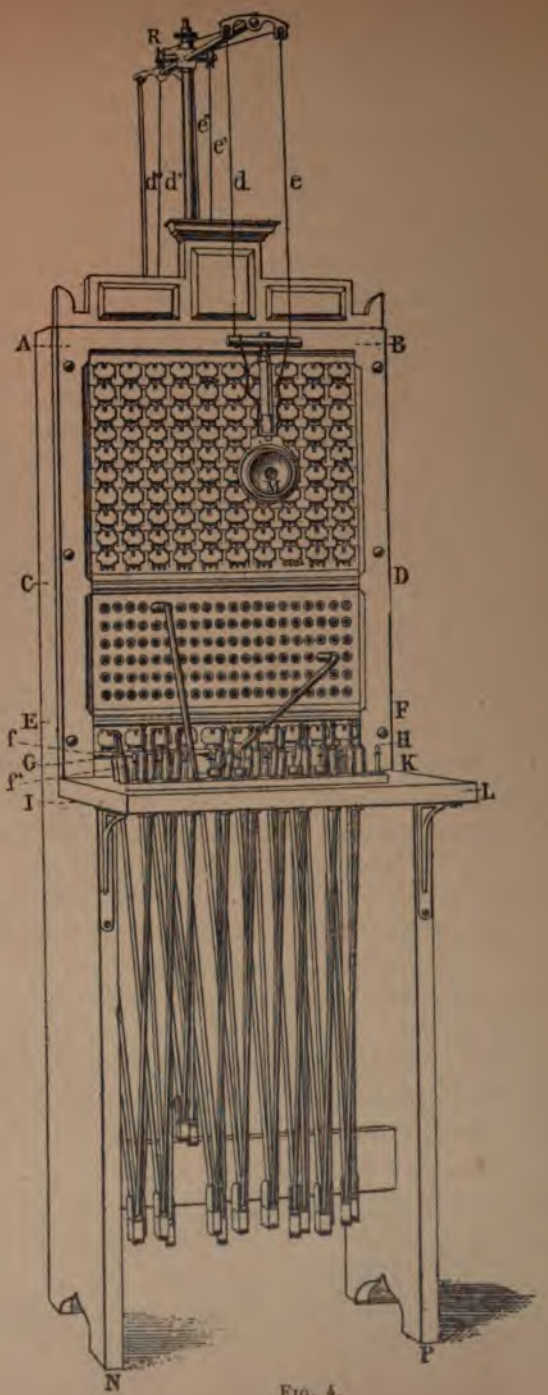

Fig. 4.

de clefs de contact dont nous allons voir à l'instant l'usage ; il est éga-

Fig. 5.

lement relié à un annonciateur de fin de conversation déterminé, celui qui se trouve dans le plan vertical comprenant déjà le jeu de clefs lui-même et la paire de fiches. Un microphone M, destiné à la téléphoniste, est suspendu en avant du panneau vertical à un support qui permet d'en régler la position en hauteur et en profondeur selon la taille et les habitudes de l'employée ; celle-ci n'a point à le tenir : un dispositif plus récent indiqué par la *fig.* 5 est encore plus commode en ce que la téléphoniste, sans gêne, emporte le microphone avec

Fig. 6.

elle dans tous ses mouvements et le retrouve toujours dans la même position par rapport à elle. D'une façon analogue, le téléphone est monté à l'extrémité d'un ressort plat assez léger (*fig.* 6 et 5) que la téléphoniste passe sur sa tête et qui maintient le téléphone à son oreille : c'est l'ensemble auquel on a donné parfois le nom assez imprévu de casque ; le poids (téléphone, ressort et cordons de jonction avec le meuble compris) est d'environ 300 grammes.

Un abonné voulant communiquer et poussant à son poste le bouton d'appel ou tournant la machine magnéto, fait fonctionner au poste central l'annonciateur d'appel relié à sa ligne, c'est-à-dire qu'un petit volet tombe, indiquant que l'abonné appelle, comme tombent les volets d'annonciateurs dans certains tableaux de sonnerie employés chez les particuliers.

L'opérateur assis devant le commutateur saisit une fiche, la fiche arrière par exemple, d'une paire disponible et l'enfonce dans le jack numéroté comme l'annonciateur qui a fonctionné. En même temps, il manœuvre l'une des clefs du groupe, dite clef d'écoute, et par là met en communication avec ces cordons, c'est-à-dire en ce moment avec la fiche utilisée et avec la ligne d'abonné, son poste de service, microphone et téléphone, qui lui permet de poser à l'abonné demandeur la question réglementaire : « Quel numéro ? » L'opérateur, par suite des dispositions que nous avons vues tout à l'heure, ayant les deux mains libres, manœuvre du reste à la fois la fiche de réponse et la clef d'écoute ; en d'autres termes, cette double manœuvre ne prend qu'un temps : de même, pendant que l'employé interroge l'abonné, il relève le volet de son annonciateur. Ayant donc demandé « quel numéro ? » et reçu la réponse, la téléphoniste, qui, tout en posant la question, a saisi la seconde fiche de la paire de cordes (la fiche antérieure), la porte dans le jack dont l'appelant a indiqué le numéro et sonne le demandé en appuyant un instant sur la clef d'appel : l'établissement de la communication est terminé, la ligne composite demandeur-demandé est constituée ; les abonnés n'ont qu'à parler. Bien entendu la clef d'écoute est ramenée au repos. Par l'enfoncement des fiches établissant la communication, l'opérateur a du reste mis automatiquement hors circuit les annonciateurs d'appel du demandeur et du demandé ; en revanche, il a établi sur la ligne composite l'annonciateur de fin de conversation affecté à la paire de cordes. Dès lors, quand les abonnés, ayant terminé leur conversation, sonneront pour faire remettre leurs lignes au

repos et les rendre ainsi libres pour toute communication ultérieure en provenance ou à destination de leur propre poste, ils actionneront l'annonciateur de fin, sans que puisse fonctionner aucun de leurs annonciateurs individuels ; la téléphoniste n'aura point à se tromper sur la signification du signal.

Au reçu de ce signal de fin, la téléphoniste retire les deux fiches et, sans avoir presque à les guider, les laisse revenir dans leurs alvéoles de repos, sous l'influence du poids tenseur dont est muni chaque cordon ; en même temps elle relève le volet de l'annonciateur de fin. Par l'aisance des manœuvres, par la compacité et la judicieuse disposition du matériel, le « standard » réalisa un énorme progrès dans l'outillage des postes centraux. Aujourd'hui encore, on peut le considérer comme le tableau commutateur normal des petits postes et des postes secondaires. Dans les postes de quelques unités seulement, on emploie des commutateurs analogues, bien que plus réduits.

A l'époque où le « standard » représentait le tableau commutateur le plus perfectionné, des raisons de construction le firent établir pour 50, puis pour 100 numéros, et, comme on prit l'habitude d'attribuer à chaque téléphoniste deux standards à 50 ou un standard à 100, on arriva le plus souvent à la proportion de 1 opérateur par 100 lignes. On a pu, avec les standards, parer au développement du service dans des bureaux desservant un nombre d'abonnés déjà considérable ; il y eut tel bureau qui, équipé avec de simples standards de type peu perfectionné, fonctionna, et fonctionna bien, jusqu'à 1.500 abonnés. Ce fut là, il faut le dire, à peu près un tour de force, dont le secret résidait tout entier dans l'esprit de méthode et la discipline excellente du personnel.

Multiples. — Présentement, les exigences croissantes de la téléphonie et aussi les nouvelles ressources créées par l'invention et les perfectionnements successifs des *multiples* font considérer 600 abonnés comme la limite au delà de laquelle il est préférable de renoncer aux standards et de recourir aux multiples. Parmi les raisons diverses que je ne puis ici passer en revue, j'en mentionnerai une qui ne demande pas de longs développements. Supposons un bureau équipé avec des standards de 100, une téléphoniste par standard : chacune peut atteindre les jacks, les lignes d'abonnés *demandés*, placés devant sa ou ses voisines immédiates ; mais, si la ligne du demandé aboutit plus loin, la téléphoniste qui a reçu la

demande doit, par un procédé quelconque, faire intervenir une de ses collègues, celle devant qui se trouve le jack du demandé. De là des répétitions d'indications et de manœuvres, des retards ; de là aussi, comme on ne peut admettre que ces indications soient données à haute voix à travers le bureau, la nécessité d'établir, d'un tableau commutateur à l'autre et sur ces tableaux, des organes accessoires affectés au renvoi des communications entre les postes d'opérateurs ; de là, en résumé, incertitude, perte de temps et perte de place.

Supposons au contraire que, par un procédé quelconque, chaque téléphoniste, après réception d'un appel, puisse atteindre directement le jack de tout abonné demandé, elle complétera par elle-même, sans dépendance vis-à-vis de quiconque, sans délai et sans travail supplémentaire, la communication désirée. Là est l'idée mère des multiples. Comme *appelants*, les abonnés avec leurs jacks et signaux d'appel spéciaux, personnels, restent distribués par groupes de 100, 150 ou davantage, chaque groupe surveillé par une même téléphoniste. Mais, *comme appelés éventuels*, ils sont, à portée de chaque téléphoniste, représentés par un jack d'usage banal pour toute communication à destination de leur ligne, et pour ce motif dénommé *jack général*, tandis que le jack spécial à l'abonné, celui du groupe de 100 à 150 ou plus, ci-dessus visé, jack sur lequel on se porte pour recevoir la demande consécutive à son appel, est dénommé *jack individuel*. L'existence des jacks généraux n'implique pas que la

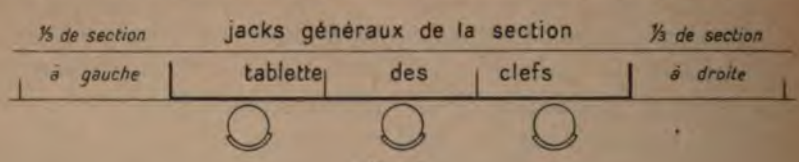

Fig. 7.

ligne d'abonné se subdivise au bureau entre autant de jacks généraux qu'il y a de téléphonistes, car, de même que pour les standards, une téléphoniste peut atteindre les jacks placés devant ses voisines. Le groupe de jacks généraux représentant une fois, et une seule, à portée de la téléphoniste, toutes les lignes d'abonnés, porte le nom de *section* : la section se répète identique à elle-même de proche en proche tout le long du meuble, chaque section nouvelle étant exactement juxtaposée à la voisine ; chaque section comporte trois places d'opérateurs, en sorte que la téléphoniste du centre atteint la section

entière, celle de droite les deux tiers droits de la section plus le tiers gauche de la section contiguë de droite, la téléphoniste de gauche les deux tiers gauches de la section plus le tiers droit de la section contiguë de gauche : à chaque place d'opérateur, comme je l'ai dit, est affecté un groupe de 100, 150, etc., jacks individuels et signaux individuels d'appel à surveiller. La répétition des lignes d'abonnés sous forme de jacks généraux, cette faculté de les atteindre en des points multiples d'un grand bureau, ont fait désigner les commutateurs dérivés du principe que je viens d'exposer sous le nom de commutateurs *multiples*, et les lignes y sont dites *multiplées*. Grâce à un artifice spécial, l'opérateur, avant de relier à la ligne appelante une ligne demandée, peut s'assurer que celle-ci n'est pas déjà occupée et se garder ainsi d'introduire un tiers, l'appelant actuel, dans une conversation déjà engagée : on dit alors que l'opérateur fait l'*essai* de la ligne.

Mais la capacité des multiples n'est pas indéfinie, c'est-à-dire que le nombre de jacks généraux massés sur la surface d'une section est forcément limité : au delà, il faut de nouveau recourir aux renvois de communication d'un meuble à l'autre, comme précédemment avec les standards, et subir l'intervention de deux téléphonistes. Ce sont là de graves inconvénients auxquels il importe de se soustraire le plus longtemps possible. On a donc tout naturellement cherché à conserver les avantages des multiples par un accroissement de la capacité de ces meubles : aussi, de perfectionnement en perfectionnement, la capacité des multiples a-t-elle été en augmentant constamment. Il y a quinze ans, la capacité maxima pratique était par beaucoup estimée à 6.000; on arrive aujourd'hui à 9.600 (bureau de la rue Desrenaudes à Paris), 14.400 (Bruxelles), 18.000 (Londres, nouveau central) et 20.000 (Budapest). Il va de soi que toujours les jacks généraux sont distribués systématiquement, de manière que l'opérateur, au simple énoncé du numéro d'un demandé, sache où trouver le jack correspondant. A cet effet, les jacks, analogues à ceux des standards, mais plus petits, sont montés dans de l'ébonite par réglettes de 20 (*fig.* 8), semblables à celle que je tiens, et les réglettes empilées par 5 ; on obtient ainsi des centaines distinctes, séparées des centaines de droite ou de gauche par les montants du meuble et des centaines supérieures ou inférieures par de minces réglettes en bois blanc : le meuble se présente ainsi (*fig.* 9) sous l'aspect de panneaux verticaux encadrés latéralement par les montants et laissant

Fig. 8.

sur le fond sombre, coupé de centaine en centaine par des lignes blanches horizontales, apparaître nettement les petits cercles métalliques, les petites bagues en laiton, qui représentent les jacks : ceux-ci sont numérotés uniformément dans chaque centaine et le numéro de la centaine apparaît à côté d'elle sur une étiquette d'ivoire fixée au montant gauche du panneau, la première centaine, celle d'indicatif 0, en bas du premier panneau de gauche de la section, la seconde centaine, celle d'indicatif 1, dans le second panneau, au même niveau, et ainsi de suite jusqu'au dernier panneau de la section ; puis on recommence dans le même ordre une nouvelle couche de centaines par-dessus la première, et ainsi de suite. Selon les dimensions des jacks et les besoins de l'entreprise exploitante, la section comprend un nombre de panneaux différent : c'est ainsi qu'on trouve 7 panneaux dans le multiple de la rue Gutenberg, troisième étage, à Paris, et 10 dans le récent multiple de Budapest, auquel nous avons fait allusion.

Multiple à batterie centrale. — En même temps qu'augmentait le nombre des abonnés augmentait aussi le nombre de leurs conversations respectives et, il faut bien l'avouer, leurs exigences : on demande toujours plus qu'on a, c'est une imperfection à laquelle les abonnés n'échappent pas. Sous l'influence de cette tendance et aussi pour des raisons beaucoup plus sérieuses, les multiples ont subi des transformations qui, dans les réseaux comme Bruxelles, Budapest, Londres par exemple, où l'on a pu différer la réorganisation jusqu'à une époque récente, et dans celui de New-York qui, pour des raisons diverses, s'est trouvé à la tête du

Fig. 9.

mouvement, ont fini par doter les abonnés d'un service quasi automatique. C'est le service, c'est le genre de manœuvres auxquels je faisais allusion en débutant. C'est le système dit de la « batterie centrale ».

Sans détail de montage ni de communication, en voici, dans les grandes lignes, le fonctionnement. Au moment où l'abonné enlève le téléphone du crochet commutateur de son poste, le crochet, obéissant à un ressort de rappel, ferme le circuit de la ligne d'abonné; comme celle-ci, au poste central, se complète à travers le jack individuel sur une batterie d'accumulateurs et un relais commandant une petite lampe à incandescence telle que celle-ci (*fig.* 10), la lampe s'allume et illumine la lentille opaline dont elle est coiffée : l'illumination très nette, bien que très douce, de cette lentille, du reste en saillie, attire instantanément l'attention de la téléphoniste. Compact et dénué de tout mécanisme comme il est, ce signal peut être disposé en réglettes où il est immédiatement superposé au jack individuel (*fig.* 11), et par là diriger instantanément, au moment où elle saisit la fiche de réponse, le mouvement de la téléphoniste vers le jack individuel même où elle doit enfoncer cette fiche ; le mouvement est rendu presque instinctif, l'action est franche et brève. En même temps, de la main ne manœuvrant pas la fiche, la téléphoniste, comme avec le standard, met sur position d'audition la clef d'écoute correspondant à la paire de cordons attaquée ; elle pose aussitôt à l'appelant la question « quel numéro ? » L'appelant donne le numéro de l'abonné qu'il désire, ce numéro est collationné, c'est-à-dire répété pour contrôle, par la téléphoniste, et celle-ci, qui a déjà saisi la seconde fiche, dite fiche d'appel, de la paire de cordes, n'a plus qu'à l'enfoncer, si la ligne demandée est libre, dans le jack général correspondant placé à sa portée, puis à sonner le demandé. La communication est complète et la téléphoniste se retire. Toute lampe individuelle est séparée du circuit demandeur-demandé ; en revanche, deux autres petites lampes, grâce à des relais, sont reliées respectivement au cordon de chacune des fiches ; quand les abonnés ont terminé et remettent leurs téléphones au crochet, les deux lampes en question s'éclairent, et voilà tout le signal de fin de conversation.

Fig. 10.

Dans la parfaite simplicité de manœuvres qu'il comporte, le système ci-dessus de jonction et de disjonction de deux lignes constitue le point capital de l'ensemble; tout y converge, et nous devons nous y arrêter.

J'ai dit tout à l'heure : « si la ligne demandée est libre, la téléphoniste n'a plus qu'à enfoncer la fiche d'appel dans le jack général correspondant ». Mais la ligne peut n'être pas libre, et voici deux hypothèses entre lesquelles il faut avoir le moyen de décider : 1° la ligne est libre; 2° la ligne est occupée. De plus, pour que la conversation puisse s'engager, même la ligne étant libre, il faut que le demandé vienne au téléphone, d'où, s'il n'y vient pas, une troisième hypothèse : ligne libre, l'abonné ne répond pas. Enfin, dans les trois cas, le demandeur doit être mis au courant de la situation. Comment, sans perte de temps et avec sûreté, satisfaire à ces exigences?

A. Ligne libre ou ligne occupée. La téléphoniste (nous savons qu'elle a le téléphone constamment à l'oreille), se préparant à enfoncer la fiche d'appel dans le jack général, touche du bout de cette fiche la bague formant l'entrée du jack : 1° si elle n'entend aucun bruit au téléphone, elle sait que la ligne est libre, achève l'enfoncement de la fiche, sonne le demandé et se retire du circuit en ramenant au repos la clef d'écoute. Si l'appelé répond, la conversation s'engage entre lui et le demandeur resté à l'appareil (nous verrons plus tard à quoi se réduit en ce cas, dans un réseau bien mené, l'attente du demandeur); 2° au

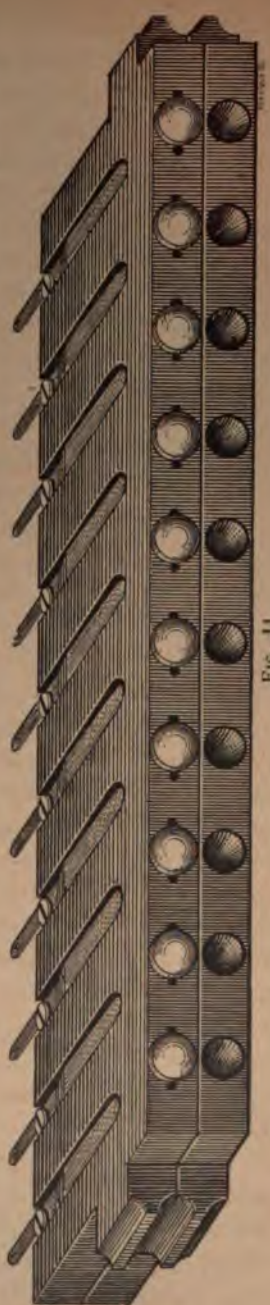

Fig. 11.

contraire, si le contact entre la pointe de la fiche et le jack général détermine dans le téléphone d'opérateur un petit claquement, un *tac*, la téléphoniste apprend par là que la ligne demandée est occupée et ramène la fiche ; avant toutefois de l'abandonner dans son alvéole de repos, elle l'enfonce dans un certain jack dit de « ligne occupée », auquel aboutit un circuit de trembleur. Le demandeur, son téléphone à l'oreille, perçoit le bruit rythmé du trembleur, connaît, sans autre manœuvre ni conversation, que la ligne est occupée, remet son téléphone au crochet et retourne à ses affaires.

B. Ligne libre, l'appelé ne répond pas. Avant tout, notons que les deux lampes de cordons permettent de suivre d'une façon absolument continue, sans y intervenir et simplement à la vue, les phases de la communication sur la ligne composite demandeur-demandé, ce qui les fait du reste désigner sous le nom de *lampes de surveillance* ou *de supervision*. Les relais qui les commandent sont en effet disposés de telle sorte que, les abonnés étant en conversation, les deux lampes restent éteintes ; par contre, l'un des abonnés, pour une raison quelconque (absence, recherche d'un renseignement, etc.), laisse-t-il ou met-il son téléphone au crochet, la lampe du cordon correspondant à cet abonné s'allume, la lentille opaline s'éclaire. Dès lors, avant qu'un abonné appelé ne soit à l'appareil, la lampe appartenant au cordon de la fiche d'appel est lumineuse, tandis que celle du côté du demandeur, qui a son téléphone à l'oreille, reste obscure. Quand, au bout de quelques secondes, le demandé décroche son téléphone, il provoque l'extinction de sa lampe, les lentilles opalines deviennent toutes deux obscures, la téléphoniste sait que les abonnés correspondent. Si l'appelé ne répond pas, sa lampe de surveillance va rester lumineuse, et la téléphoniste, tout en vaquant à d'autres communications, ne pourra s'empêcher d'apercevoir, sur la tablette horizontale des clefs et des fiches, en avant d'une paire de cordons en service, cette paire de lampes placées l'une devant l'autre et dont l'une est allumée, l'autre sombre : au bout d'un instant, si la situation reste la même et sauf à sonner de nouveau préalablement le demandé, elle retirera du jack général la fiche d'appel et, l'enfonçant dans un second jack spécial, à trembleur d'un rythme nettement distinct du précédent, donnera ainsi au demandeur, sans perdre en conversation son temps ni le sien, sans se détourner par exemple de l'établissement d'une autre communication, le signal « abonné ne répond pas ». Enfin si, dans le cours ou à la fin

d'une conversation, un abonné veut rappeler le poste central, il lui suffit de faire osciller le crochet de son poste et de déterminer ainsi une série d'éclats dans la lampe de supervision correspondante; l'illumination intermittente de la lentille qui la coiffe provoque l'attention de la téléphoniste, et celle-ci rentre sur la ligne en manœuvrant la clef d'écoute.

En somme il y a là un système de signalement remarquablement simple et remarquablement complet, et la portée en dépasse de beaucoup l'agrément procuré à l'abonné en le dispensant d'appuyer sur un bouton de sonnerie ou de tourner une manivelle de magnéto ; la proximité du jack et de la lampe individuels, la surveillance des phases de la communication et le signal automatique de fin de conversation ont un tout autre intérêt. Sur ce dernier point j'ajouterai un mot : il y a nécessité majeure pour la régularité et la promptitude du service à ce que toute ligne cessant d'être utilisée soit remise à la position d'attente, sinon les communiquants antérieurs subiront un délai quand ils voudront une autre communication ou bien, s'ils sont demandés par un autre abonné, on refusera leur ligne parce qu'elle sera trouvée occupée ; de plus, toute communication restant sans besoin établie entre deux lignes implique l'immobilisation inutile d'une paire de cordons, qui parfois pourrait être employée ailleurs et qui, si elle n'a pas d'emploi immédiat, encombre indûment le tableau commutateur. A tous égards, l'indication précise de la fin de la conversation par la correction de fonctionnement du matériel et la fidélité des abonnés à émettre le signal présente une grosse importance.

Or il arrive souvent, là où le signal de fin n'est pas automatique, que des abonnés négligent de le donner ; le personnel, faute de le recevoir régulièrement et trop fréquemment obligé d'intervenir de lui-même pour s'assurer si une conversation est encore en cours ou se trouve terminée, prend l'habitude de se porter à chaque instant sur les communications établies pour poser l'agaçante question « Terminé ? » Sur ce point l'amélioration du service dans les réseaux non dotés de matériel moderne est, question de bonne marche des appareils réservée bien entendu, entre les mains des abonnés ; devant l'indifférence d'un trop grand nombre parmi eux, il n'est pas douteux que l'automaticité du signal de fin ne constitue un énorme progrès.

Diverses questions pourraient être abordées au sujet du système de signaux dont il s'agit ; mais l'heure avance et je passe.

Postes centraux automatiques. — Là où la liberté d'action des entreprises publiques ou privées n'a pas été entravée, vous voyez que le service est devenu pour les abonnés d'une simplicité, d'une facilité et (nous le verrons tout à l heure) d'une efficacité remarquables. Mais si, dans les systèmes dont je viens de vous donner une idée, une large part est déjà faite à l'automatisme, ne peut-on aller plus loin? En d'autres termes, ne peut-on supprimer les employés? C'est une question que les abonnés posent en tous pays, et il leur semble parfois que, si les téléphonistes étaient supprimées et remplacées par quelque engin mécanique, on serait bien près de la perfection. Il convient à ce sujet de ne pas entretenir de trop vastes espoirs. Le mécanisme en question, l'ensemble d'appareils destinés, sur l'appel d'un poste, à en aller chercher un quelconque parmi plusieurs centaines ou plusieurs milliers d'autres, présente nécessairement un certain degré de complication ; comme tout appareil ou ensemble d'appareils, il sera sujet à des dérangements. D'autre part, on ne supprimera jamais complètement les employés par la raison simple qu'en téléphonie, au contraire de ce qui se passe en télégraphie, le public est pour une part à lui-même son employé (et il faut bien admettre que parfois des difficultés viennent des abonnés eux-mêmes), ensuite parce que jamais les appareils automatiques, personne n'a de doute à ce sujet, ne pourront satisfaire à certains besoins, par exemple à l'établissement de communications interurbaines [1]. Quoi qu'il en soit, le problème est tentant, et diverses solutions ont été données pour l'automaticité des manœuvres de mise en communication. Dans la pratique, un assez grand nombre de postes ont été établis pour des abonnés groupés par 2, 5 et jusqu'à 10, désirant n'employer qu'une même ligne vers un poste central commun et communiquer entre eux ; ce sont, si l'on veut, de petits postes centraux secondaires. Mais de postes centraux dans le sens où nous l'entendons en ce moment, le nombre est minime. Presque tous, sinon tous, parmi les plus importants, sont munis d'un des commutateurs dérivés par perfectionnements successifs d'une invention faite, en 1889 environ, par M. Almon B. Strowger. Si mes souvenirs sont exacts, la manœuvre du poste d'abonné est restée ce qu'elle était dès le début ou tout au moins il y a une dizaine d'années ; voici en quoi elle consiste. Le poste

[1] A Grand Rapids (Michigan, États-Unis), lors du remplacement du commutateur manuel par un commutateur automatique, on conserva 48 téléphonistes sur 145, soit un tiers.

d'abonné (*fig.* 12) comprend un disque métallique mobile autour du centre et portant sur la moitié du pourtour dix trous correspondant aux dix chiffres 0, 1, 2, ..., 9 : si l'on veut appeler un abonné, l'abonné 61854 par exemple, on placera l'index dans le trou numéroté 6, et l'on fera tourner le disque dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce que le doigt rencontre un butoir : on le retire alors et on laisse le disque revenir, sous l'action d'un ressort, à la position de repos ; puis on recommence pour le chiffre 1, puis pour le chiffre 8, pour le chiffre 5 et pour le chiffre 4. Les rotations partielles successives du disque ont eu pour effet de mettre en mouvement, au poste central, de petits frotteurs reliés les uns après les autres à la ligne appelante et opérant pour ainsi dire d'abord la sélection des dizaines de mille, puis celle des milliers, puis celle des centaines, puis celle des dizaines et enfin celle des unités. A ce moment la ligne appelante est en communication avec la ligne 618 54, et l'abonné peut sonner son coabonné n° 61854. Évidemment la manœuvre est pour les abonnés moins simple et moins prompte que celle de tout à l'heure, consistant à décrocher le téléphone ; mais il faut bien se dire que, dans tout système où l'on fera disparaître l'opérateur, il en sera de même sous une forme ou sous une autre ; la sélection de la ligne désirée qui était, sur ordre verbal, opérée par la téléphoniste, devra être effectuée directement par le demandeur à l'aide de procédés mécaniques. Les systèmes automatiques dont je parle ne sont, à ma connaissance, représentés en Europe que par un bureau de Berlin desservant aujourd'hui, si je suis bien renseigné, 60 à 65 abonnés. Aux États-Unis, on a été beaucoup plus loin et l'on trouve des bureaux automatiques prévus pour 6.000 et 10.000 abonnés. Il n'en est pas moins vrai que, même aux États-Unis, le nombre d'abonnés usant d'un poste central automatique est très faible par rapport à ceux desservis manuellement. Le Rapport statistique récemment publié par le Ministère du Commerce et du Travail indique en effet, au 1er jan-

Fig. 12.

vier 1903, 54 commutateurs du premier genre (Strowger ou autres) contre 10.842 du second. Il est toujours difficile de prévoir l'avenir d'un groupe de procédés ; bien que celui des commutateurs automatiques n'apparaisse pas nettement pour le moment, ce genre de commutateurs ne pouvait être passé sous silence.

Complément d'équipement d'un poste central. — Pour en revenir aux notions plus générales, il me faut, en ce qui concerne les postes centraux, attirer votre attention sur ce fait que le commutateur en lui-même, fût-ce un multiple de 20.000, comme à Budapest, ne forme qu'une portion de l'équipement d'un poste central ; d'une part, en effet, il comporte des annexes immédiates, et, d'autre part, pour y obtenir ainsi que chez l'abonné la simplicité et la précision de manœuvres que nous avons vues, il faut créer au voisinage de la salle de manipulation, dont il forme à peu près le seul meuble, une série d'autres salles, d'autres départements. Toute pile ayant été supprimée chez l'abonné, nous en retrouvons l'équivalent au bureau central; une salle d'accumulateurs, les uns en service, les autres de rechange, doit fournir les courants nécessaires aux microphones, aux relais, aux lampes : à côté nous aurons une salle de machines dynamo-électriques pour la charge des accumulateurs, les courants d'appel, l'éclairage des locaux ; ces machines électriques seront actionnées par des moteurs à gaz ou à vapeur; il faudra actionner aussi des ventilateurs pour envoyer, au moins dans la salle de manipulation, de l'air purifié, frais en été, chaud en hiver, humidifié au degré voulu pour une respiration normale : bref, c'est une usine entière à installer. La poussière sur les jacks, les clefs, etc., étant un des principaux obstacles à de bonnes communications, on établit en outre des vestiaires séparés, afin que le personnel n'introduise dans la salle de manipulation ni la poussière de l'été, ni la boue de l'hiver, qui se résoudrait elle aussi en poussière. Par ailleurs il est de bonne administration de mettre à la disposition du personnel, comptant parfois plusieurs centaines de téléphonistes, une salle de repos, une autre salle où l'on puisse faire réchauffer quelques vivres apportés du logis, etc. : ce ne sont pas là seulement des éléments de confortable offert au personnel dans un esprit de patronage éclairé, c'est une facilité réservée à la direction de mieux combiner les heures de service, mieux organiser et mieux employer les brigades. Pour la correction et la rapidité du service, pour l'économie d'installation dont les conditions se trouvent heureusement les

mêmes, on doit exiger du personnel un travail soutenu, méthodique actif; par contre, et peut-être serait-il mieux de dire par suite, il convient de ménager aux téléphonistes un repos franc, lorsque l'allure du trafic et l'organisation permettent d'interrompre ce travail pour une partie d'entre elles; or le repos ne saurait être pris dans la salle de manipulation, ce n'en est pas le lieu; il doit l'être ou chez soi, ou dans une dépendance du bureau, qu'on rendra confortable si faire se peut.

Quant aux annexes du commutateur multiple auxquelles je faisais tout à l'heure allusion, je me contenterai de vous signaler en particulier : 1° un *répartiteur d'entrée*, gros bâti formant commutateur, auquel arrivent d'une part les fils de ligne, d'autre part les câbles de multiple, et grâce auquel, à travers leurs changements de domicile, c'est-à-dire de lignes, on conserve aux abonnés leur numéro d'appel, leur numéro de jack général (ou leur numéro de standard dans les postes secondaires); 2° un *répartiteur intermédiaire* destiné à maintenir d'année en année, entre les diverses téléphonistes, l'équilibre de travail que tend constamment à rompre la variation dans le nombre des appels émanés de tels ou tels abonnés, en raison du changement d'allure de leur industrie ; 3° un bâti pour les relais ; ce sont là des meubles considérables. Je passe sous silence d'autres accessoires dont je ne pourrais faire mention sans vous donner des explications trop longues. Quelques données de construction achèveront de vous fixer sur l'importance de ces ensembles que constituent les grands bureaux téléphoniques : pour prendre celui qui se trouve plus près de nous, l'hôtel des Téléphones dit de la rue Gutenberg, à Paris, comprenant quatre étages et un sous-sol, a 63 mètres de long y compris les grosses rotondes qui le terminent, avec quatre salles principales de 60 mètres sur 10 mètres en nombres ronds, 5 mètres à peu près de hauteur sous plafond et un sous-sol égal, mais moins élevé ; l'hôtel des Téléphones de Bruxelles, rue de la Paille, mesure 60 mètres de longueur, 22 mètres de largeur.

Nous venons d'étudier le poste central, d'en percevoir la complexité, d'en saisir assez pour nous rendre compte de la délicatesse que présente, même dans le cas simple d'un réseau implicitement supposé doté d'un bureau unique, ce problème de la mise en communication qui est présentement le problème critique de la téléphonie. Mais, si le poste central représente le point constamment dangereux du service, il n'en est pas, malgré la masse de matériel qui y est

accumulée, l'instrument le plus dispendieux à établir : l'outil le plus cher à créer, c'est la ligne.

Ligne. — Dans les régions téléphoniquement peu denses, il faut aller chercher chaque abonné par une ligne souvent aérienne et néanmoins relativement coûteuse, dont les appuis sont mal utilisés en raison du petit nombre de conducteurs supportés ; quand il s'agit, comme appuis, d'emprunter les immeubles privés, on doit compter en outre sur l'indemnisation des propriétaires ; même dans les pays où la législation présente déroge au principe général de l'expropriation que toute diminution forcée de jouissance de la propriété privée, fût-ce pour cause d'utilité publique, doit être payée, il est prudent de ne pas s'y fier, le retour aux principes pouvant se produire d'un moment à l'autre. Dans certains cas, la voie publique même peut n'être occupée qu'à titre onéreux. Si, maintenant, des districts à faible densité téléphonique nous revenons vers les postes centraux, nous constatons en général que peu à peu les lignes aériennes se transforment en lignes souterraines. Dans certaines villes, le réseau presque entier est souterrain. Ici nous ne devons pas nous laisser illusionner par le cas de Paris : l'admirable réseau d'égouts dont nous jouissons est unique au monde, et, s'il permet d'installer sans de trop grands frais un réseau de conducteurs téléphoniques, il ne faut pas oublier que, dans l'immense majorité des cas, on ne rencontre rien de semblable et que, pour les grands réseaux, la création de canalisations souterraines devra être achetée au prix de travaux dispendieux. Sans aller bien loin, nous en trouverons la preuve à Bruxelles et à Londres, qui viennent d'être dotées de beaux réseaux souterrains : les projections qui vous sont faites montrent le bouleversement qu'il fallut introduire dans les voies publiques de ces deux villes, aussi bien au voisinage du gracieux square des Métiers de la première que sur le célèbre pont de Londres avec son intense circulation. Vous voyez là deux genres de canalisations. C'est qu'en effet les canalisations ne sont pas partout les mêmes, et l'on peut ajouter que, sur ce point comme sur les autres, bien des tâtonnements ont pris place, allant de l'égout, sur le radier duquel les conducteurs arrangés en câbles sont simplement déposés, jusqu'aux conduits dont la photographie vient de passer sous vos yeux. On est à peu près unanime aujourd'hui à réserver pour chaque câble un conduit particulier, et ce n'est guère que sur les divers modes d'application de ce principe que s'exerce présentement

l'esprit d'invention. Vous avez vu dans la section suédoise (Palais des Machines), à l'Exposition de 1900, les blocs en ciment moulé, forés de trous cylindriques en nombre variable suivant le nombre de câbles prévus, exposés par M. Axel Hultman ; on cimente ces blocs bout à bout et l'on constitue ainsi une grosse canalisation percée de part en part de trous cylindriques réguliers; un système semblable est en usage à Saint-Pétersbourg. Au pont de Londres, au contraire, vous trouvez de longs tubes en fer à emboîtement; une solution de ce genre peut être seule acceptable, si l'on a, d'une part, de longues lignes droites ou très faiblement incurvées et, d'autre part, peu d'épaisseur sous pavage. Comme solution générale, celle qui présente le plus de souplesse est celle qui, après avoir fait ses preuves aux États-Unis, a été adoptée par l'Administration belge des Télégraphes et, avec de légères modifications, pour la majeure partie du réseau de Londres. L'élément primaire (*fig.* 13) est un petit prisme en grès vitrifié, imperméable par conséquent ainsi que non conducteur et chimiquement inerte, de 45^{cm},5 environ de long, à section extérieure carrée de 11^{cm},43 de côté avec angles abattus, et perforation centrale de 7^{cm},6. A l'aide de ces prismes très maniables, on construit comme avec des briques, dans le fond de tranchées convenables, de longs petits massifs de maçonnerie, de longues murettes, où les prismes disposés dans le prolongement les uns des autres fournissent les conduits dans chacun desquels on tirera plus tard un câble : le nombre de câbles à prévoir détermine le nombre de prismes juxtaposés et empilés.

Fig. 13.

Dans tous les systèmes de canalisations souterraines, à intervalles variables résultant du genre de câbles à introduire et du profil de la ligne, on interrompt la conduite par des regards, des trous d'homme, petits caveaux en sous-sol maçonnés soigneusement, où la conduite débouche de ses deux ou trois ramifications par des séries de trous qui ne sont autre chose que les orifices des conduits élémentaires.

Les câbles qu'on y introduit se présentent sous forme de tubes de plomb; mais le rôle de ces tubes est simplement de protéger le câble véritable placé à l'intérieur : celui-ci est essentiellement formé de conducteurs en cuivre de haute conductibilité isolés (pratiquement à l'aide

de papier) l'un de l'autre et de l'enveloppe de plomb, légèrement tordus deux par deux, les paires de conducteurs ainsi constituées étant enroulées par couches successives, suivant des hélices à pas allongé. Chacun des détails que je viens d'indiquer a sa raison d'être. Le cuivre, de haute conductibilité, est choisi de façon à réduire, sous un volume déterminé, la résistance du circuit de ligne au minimum possible. L'isolement au papier, vu la porosité de cette matière, peut être considéré en grande partie comme un isolement mécanique où la cellulose joue surtout le rôle de cale, de séparateur continu, permettant l'isolement électrique par l'air inclus dans les pores ou entourant l'ensemble. Le cordelage des paires de conducteurs met les circuits métalliques correspondant à chacune d'elles à l'abri des influences électriques extérieures au circuit ou, plus exactement, opère sur celui-ci la compensation des influences perturbatrices s'exerçant sur chacun des deux fils élémentaires de la paire ; c'est par là qu'on évite en particulier l'audition, sur un circuit, de la conversation échangée par un circuit voisin ; la nécessité pour une conversation correcte d'employer deux fils et de les faire alterner de position a été signalée, en 1879 [1], par M. Hughes, qui avait, sur le désir de l'Administration des lignes télégraphiques de France, entrepris, dès 1868, une série d'expériences pratiques dans le but de remédier aux inconvénients de l'induction mutuelle entre circuits télégraphiques et, comme je l'ai dit en commençant, le réseau téléphonique souterrain de Paris a été depuis l'origine établi sur ce principe : pour les lignes aériennes, on a résisté longtemps à l'obligation d'alterner les positions ; dans certains réseaux, on a même nié l'utilité des circuits bifilaires ; aujourd'hui l'on peut dire que toutes les oppositions ont disparu et, dans les cas où le circuit bifilaire n'est pas encore adopté, c'est le résultat pur et simple de la situation financière : quant à l'équivalence de la position moyenne de chaque fil d'une paire vis-à-vis des influences extérieures, on l'assure maintenant toutes les fois qu'un circuit bifilaire aérien est un peu long.

Enfin l'enveloppe de plomb qui, par soudures aux raccords des sections successives, est rendue continue d'un bout à l'autre, maintient le câble intérieur à l'abri de l'humidité. Ce point est capital. L'air sec est le meilleur des diélectriques pour les conducteurs

---

[1] Voir *Annales télégraphiques*, 1879, pp. 163 et 209 ; — *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, 1879, p. 163.

affectés aux transmissions téléphoniques, parce qu'il est celui donnant le plus haut isolement et la plus basse capacité, qualités capitales pour une bonne transmission. Mais, dès que la siccité en disparaît, ces qualités disparaissent en même temps : de plus, quand, par accident quelconque, l'humidité devient trop forte, le papier toujours plus ou moins hygrométrique crée des dérivations, des mélanges selon l'expression usitée, entre les fils du câble. Comme on ne peut admettre que jamais un accident ne se produira, c'est une des objections qu'on faisait il y a un certain temps aux gros câbles sous papier, par ailleurs si avantageux : d'une part, la moindre piqûre au tuyau de plomb devait faire tomber instantanément l'isolement à cause de l'emploi du papier au lieu de gutta-percha, caoutchouc, etc., et, d'autre part, l'accumulation d'un grand nombre de circuits sous la même enveloppe de plomb, tout appréciable qu'elle fût au point de vue du prix de revient, entraînait en cas de dérangement la mise hors service de tous ces circuits. Pour atténuer partiellement ces inconvénients ou plutôt pour en limiter le développement, on avait adopté la précaution de verser, en usine ou après pose, aux deux bouts de chaque longueur de câble, de la paraffine fondue qui, en se refroidissant, formait bouchon : dès lors, quand une section devenait mauvaise, les autres étaient protégées contre l'invasion de l'humidité. Il n'en est pas moins vrai que la seule ressource était de relever la longueur de câble défectueuse et de la remplacer par une autre ; pareille opération, en dehors des dépenses qu'elle occasionne, est toujours un élément de trouble pour le service. En réalité, les accidents de ce genre sont relativement peu fréquents dans les canalisations de poterie, de ciment ou de fer dont nous avons parlé. Quant aux câbles dont on peut atteindre les parties défectueuses sans enlever au préalable la section endommagée (câbles aériens, auxquels la cherté des canalisations souterraines oblige à recourir assez souvent encore, câbles en égouts du réseau de Paris, câbles sous tunnels, comme ceux récemment posés à Chicago, etc.), la difficulté a été entièrement levée depuis longtemps déjà, depuis 1893, par une méthode simple et très efficace appliquée à cette époque par M. l'ingénieur Barbarat à la réparation sur place des câbles téléphoniques de Paris. Elle a donné toute satisfaction et se répand graduellement hors de France ; en voici le principe. Le câble, obturé aux deux bouts, est muni, à l'extrémité placée au poste central, d'une tubulure normalement fermée par un bouchon à vis, mais qu'on peut mettre, à travers un

dessiccateur convenable, en relation avec un réservoir d'air comprimé à l'extrémité éloignée du poste central, il porte une autre tubulure plus petite, bouchée elle aussi en temps ordinaire; aucun tampon de paraffine ni d'autre matière n'est laissé dans le câble; les enveloppes en plomb des différentes sections étant soudées les unes aux autres, on a donc un tube continu sans aucune cloison intérieure. Supposons cette enveloppe rompue en un point quelconque par corrosion, piqûres d'insectes, négligence d'un égoutier accrochant sa lampe au câble; l'humidité ambiante, peut-être de l'eau, y pénétrera; il suffira, pour remettre le câble en état, de chasser cette humidité ou cette eau après avoir bouché le trou et au besoin rétabli le papier qui doit séparer les fils ; on effectuera d'abord cette partie mécanique du travail, puis on introduira l'air sec dans le câble par la tubulure du poste central, tout en débouchant la petite tubulure de l'autre extrémité; l'air sec passant alors d'un bout du câble à l'autre enlèvera l'humidité qui s'y trouve emprisonnée et restaurera promptement le câble en son état premier : un exemple numérique précisera les idées; je le prends dans les expériences qui ont précédé et décidé l'adoption du procédé (1) : une bobine de câble à 51 paires de conducteurs sous papier, de 175 mètres de long, présentait un isolement de 256 mégohms entre la masse des conducteurs réunis et l'enveloppe de plomb ; après trois heures de passage d'air sec à la pression de 1 kg, l'isolement était monté à 2.270 mégohms. Vous voyez qu'on peut employer sans crainte les câbles sous papier ; vous comprendrez aussi que, vu leurs qualités électriques, on ait cherché à en développer l'usage et qu'on ait graduellement augmenté le nombre des conducteurs pour réduire le prix de chaque circuit posé : on est arrivé successivement aux câbles à 121 paires, 200 paires, 300 paires ; on a été jusqu'à 600 paires.

Développement du service. — Au cours de notre revue très rapide, vous avez probablement deviné, à côté de telle ou telle question, l'existence de mainte autre dont le manque de temps ne permettait pas l'examen : il en est bon nombre, en effet, que j'ai dû négliger ; pour en citer deux ou trois, je me suis tu sur la question complexe de la singularité ou de la pluralité des bureaux dans un même lieu, sur les communications interurbaines, sur les modes de taxation. Mais je veux essayer, en terminant, de vous montrer le chemin par-

(1) *Annales télégraphiques*, mai-juin 1891, p. 216.

couru en vingt-cinq ans ; un petit nombre d'exemples numériques y suffira sans doute. Je les extrais en partie des renseignements officiels fournis au *Journal télégraphique international* de Berne [1] par les diverses administrations ; pour les États-Unis, où l'initiative privée, seule en jeu, a manifesté son habituelle fécondité et dont les statistiques, s'appliquant à un pays unique de 75 à 80 millions d'âmes, présentent plus de chances d'homogénéité que celles provenant de nations différentes, les données sont presque toutes empruntées au rapport sur les téléphones et les télégraphes dont j'ai déjà parlé.

Le 31 décembre 1902, les réseaux *urbains* comprenaient, en kilomètres de *fils :*

PAYS	FILS AÉRIENS en service	FILS SOUTERRAINS			EXPLOITANT
		en service	plus : en réserve	plus : soit 0/0	
Allemagne	401.273	375.474	266.120	70,8	Etat.
Belgique	50.635	28.419			Etat.
Danemarck	53.085	30.925	13.991	45	Compagnies privées
France	81.773	201.836	100.367	49	Etat.
Grande-Bretagne et Irlande	727.876				Compagnie privée (National Telephone C°).
Norvège	52.409	16.106	12.300	76	Etat. Compagnies privées
Suède	112.078				Etat. Compagnies privées. Sociétés mutuelles d'habitants.
Suisse	44.662	124.429			Etat.

Il convient d'ajouter que le développement de *fils*, en kilomètres, du réseau aérien interurbain était : Allemagne, 188.493 ; Belgique, 17.502 ; Danemark, 26.696 ; France, 157.839 ; Norvège, 47.172 ; Suisse, 19.541. Aux États-Unis, l'ensemble des réseaux urbains et interurbains renfermait 7.786.282 kilomètres de conducteurs, tant aériens que souterrains.

[1] *Journal télégraphique, publié par le Bureau international des Administrations télégraphiques*, 1904, p. 152 et seq. : Statistiques des communications téléphoniques, année 1902.

Au 31 décembre 1902, nous trouvons en France 2.323 réseaux téléphoniques (dont les plus importants comptaient, en nombres ronds, au 1er janvier dernier : Paris, 36.100 abonnés; Lyon, 3.100; Marseille, 3.000; Bordeaux, 2.500; Lille, 1.350; le Havre, 1.100; Rouen, 1.000); en Allemagne, 3.692; en Belgique, 17; en Danemark, 79; en Norvège, 201; en Suède, 180; en Suisse, 330.

Le nombre des postes d'abonnés était de 388.741 pour l'Allemagne, 19.765 pour la Belgique, 38.514 pour le Danemark, 94.350 pour la France, 246.092 pour la Grande-Bretagne et l'Irlande (National Telephone C°), 35.481 pour la Norvège, 94.101 pour la Suède, 45.745 pour la Suisse, 2.224.066 pour les États-Unis, 48.481 pour le Canada (Bell Telephone C°); l'Allemagne possédait en outre 19.081 cabines publiques, la France 3.515 et les États-Unis 91.231.

Les conversations urbaines entre abonnés ou entre abonnés et cabines publiques s'élevaient, pour l'année 1902, en Allemagne à 727.465.567, en Belgique à 36.467.350, en Danemark à 67.862.000, en France à 176.755.741, en Grande-Bretagne et Irlande (National Telephone C°) à 840.000.000 environ, en Norvège à 75.692.055, en Suède à 162.508.500, en Suisse à 23.242.737, aux États-Unis à 4 milliards 950 millions. Ces totaux formidables prennent une signification plus nette si on les rapproche de ceux fournis par le trafic télégraphique, avec lequel l'esprit est mieux familiarisé; c'est ainsi que, dans le réseau téléphonique de Paris, il doit, en ce moment, s'échanger chaque jour à peu près trois fois plus de conversations qu'il n'y a de télégrammes reçus ou transmis au Poste central des télégraphes : quant aux 4 milliards 950 millions de conversations locales des États-Unis, comparés aux 91.650.000 télégrammes privés transmis sur le territoire de l'Union dans la même période, ils représentent un échange 54 fois plus actif de communications : au lieu de 3 fois et 54 fois, on devrait même dire 6 et 108 fois respectivement, puisqu'il s'agit de comparaison avec des télégrammes et que chaque conversation téléphonique correspond non pas à un message, mais à deux au moins (demande et réponse); une conversation est au minimum l'équivalent de deux télégrammes, un dans chaque sens.

Considérés séparément, les nombres absolus ne prennent d'ailleurs pas leur vraie valeur, et l'on doit être circonspect en en tirant des conclusions : considérons la Norvège; avec ses 35.481 postes d'abonnés, elle ne semble pas en très bonne place; si nous rapprochons

ces 35.481 postes du nombre des habitants, elle apparaît au contraire la seconde des nations européennes. La proportion entre le nombre des abonnés et la population est très intéressante au point de vue de l'extension relative de la téléphonie ; voici le nombre d'abonnés par 100 habitants dans les divers pays (la population admise est celle indiquée par le recensement de 1900-1901) : 0,78 en Allemagne ; 0,29 en Belgique ; 1,55 en Danemarck ; 0,24 en France ; 0,59 en Grande-Bretagne et Irlande ; 1,58 en Norvège ; 1,83 en Suède ; 1,38 en Suisse ; 2,92 aux Etats-Unis ; 0,90 au Canada (Bell Telephone C°). Peut-être rendrait-on les comparaisons plus claires en considérant la proportion inverse et disant par exemple qu'il existe aux États-Unis 1 poste téléphonique par 34 habitants et 1 pour 413 en France. On ne peut s'empêcher de noter que, réserve faite de la Suisse, les six pays où la téléphonie est proportionnellement la plus répandue sont ceux où fonctionne l'industrie privée, seule ou en coexistence avec l'industrie d'Etat.

Pour se rendre compte de l'avenir promis à la téléphonie, il suffit de jeter les yeux sur cette courbe (*fig.* 14) représentant, de 1881 à 1905, en ce qui concerne la plus grosse compagnie des États-Unis, le nombre de postes d'abonnés au 1er janvier de chaque année. Jusqu'en 1896 à peu près, l'accroissement, bien que satisfaisant, a été relativement lent : à partir de ce moment, l'utilité du téléphone est de plus en plus appréciée, la progres-

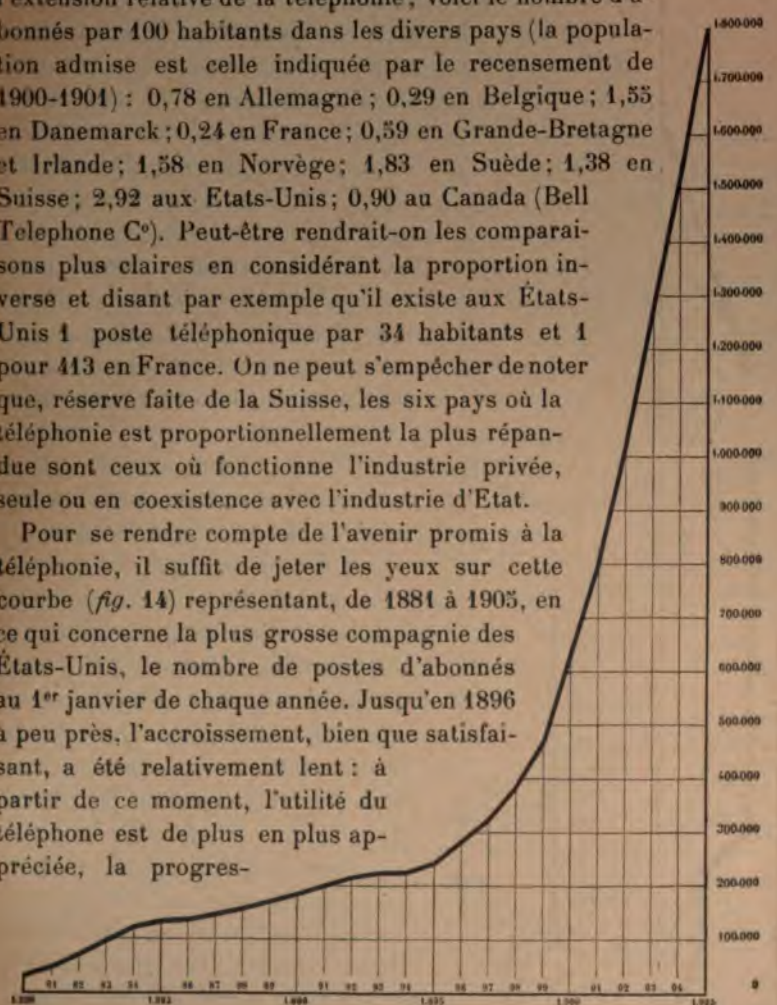

Fig. 14.

sion devient presque inquiétante ; en dehors de l'avantage présenté par l'agrégation à des réseaux déjà importants, cette progression tient à trois causes principales : le perfectionnement du matériel,

l'adoption de systèmes de taxation plus souples, enfin la cohésion communiquée au service par des règlements et un entraînement du personnel plus parfaitement coordonnés.

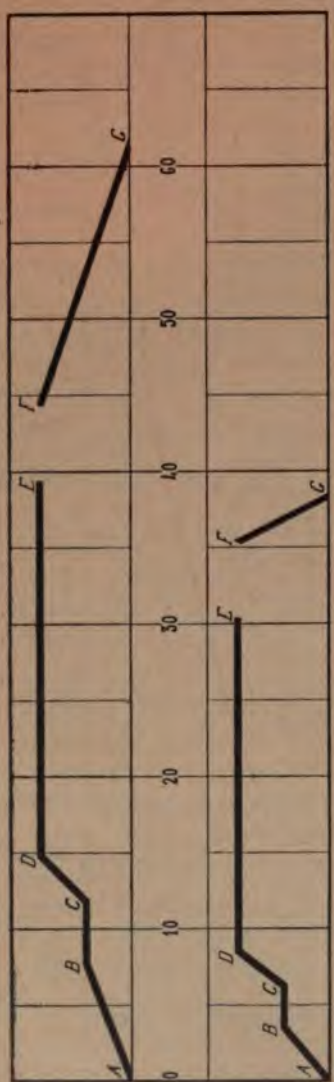

Fig. 15.

Le développement ne se poursuivra pas indéfiniment à pareille allure, cela est évident; mais il est considéré comme pouvant être, sans difficulté spéciale, poussé dans les villes jusqu'à atteindre 10 0/0 de la population : des ingénieurs compétents envisagent même comme probable d'ici à une quinzaine d'années une proportion de 15 à 20 0/0 dans les villes principales : on prévoit un million de postes d'abonnés à New-York en 1920.

Sera-t-il possible alors de parer convenablement aux nécessités du service? Sera-t-il possible de conserver à celui-ci l'efficacité aujourd'hui atteinte dans les réseaux bien outillés et bien desservis? La mission incombant aux entreprises deviendra terriblement délicate; mais le succès obtenu jusqu'ici permet la confiance. Il y a une dizaine d'années, le problème eût été jugé aussi ardu d'assurer un bon service dans un réseau de 177.000 postes d'abonnés, comme est présentement celui de New-York, accru en cinq ans de 100.000 stations. Les efforts combinés de tous, ingénieurs des compagnies et constructeurs, l'étude persévérante et minutieuse des divers éléments du service l'ayant résolu, nous pouvons compter que l'avenir nous apportera encore en temps voulu les solutions utiles. Les graphiques que vous avez sous les yeux (*fig.* 15), et qui traduisent l'état

de choses dans ce réseau, vous feront, je le suppose, partager ce sentiment. Ils représentent l'histoire, pour ainsi dire, d'une conversation entre abonnés d'un même bureau, d'une part avec les multiples d'ancien système à annonciateurs, d'autre part avec les multiples modernes à batterie centrale et signaux lumineux. Les tracés ont été obtenus de la manière suivante : on a pris l'axe des x pour axe des temps ; ceux-ci sont exprimés en secondes ; chaque segment de droite correspond à une opération, chaque brisure au commencement ou à la fin de l'opération : le temps o est celui où paraît le signal d'appel. Les valeurs numériques des temps sont les moyennes des temps chronométrés au cours de centaines de pointages faits dans des bureaux centraux différents ; la ligne brisée supérieure concerne le service des multiples à annonciateurs, l'inférieure celui des multiples actuels à batterie centrale et lampes [1]. Nous voyons qu'il s'écoule [2] :

Courbe inférieure (batterie centrale et lampes)		Courbe supérieure (annonciateurs)
3",5	entre le signal d'appel initial et l'achèvement de l'insertion de la fiche (Segment AB).....	7",7
2",69	pour recevoir et collationner le numéro demandé (Seg. BC).....	4",05
2",26	pour faire l'essai de la ligne demandée, insérer la fiche d'appel, commencer à sonner le demandé (Seg. CD).....	3",02
21",84	pour que le demandé réponde (Seg. DE).....	24",58
3",08	entre le moment où paraît le signal de fin (fonctionnement de l'annonciateur ou allumage des 2 lampes de surveillance) et celui où la communication est rompue (Seg. FG).....	17",1

Afin de raccourcir les diagrammes, j'en ai retranché la portion correspondant à la conversation et l'ai simplement rappelée par l'interruption EF : c'est un élément à peu près constant ; la constance de l'un à l'autre n'est peut-être pas rigoureuse, parce qu'en général les abonnés manœuvrent d'autant plus vite et causent d'autant plus brièvement que par ailleurs le service est lui-même plus prompt ;

---

(1) Un diagramme analogue donné jadis (*Annales télégraphiques*, 1894, p. 12) et indiquant, comme les deux présentement en cause, des résultats très favorables, n'a pas tout à fait la même valeur ; les pointages y relatifs, en nombre restreint, venaient d'un seul bureau, le service en outre étant alors (fin de 1893 ou commencement de 1894, si je ne me trompe) moins chargé et les méthodes de pointage étant moins complètes qu'aujourd'hui.

(2) H.-L. Webb, Telephone Traffic, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, May 11 th 1895, p. 295.

mais la différence est généralement faible : on peut admettre une durée de 103 secondes sans s'écarter beaucoup de la réalité.

La comparaison des deux tracés mettrait en évidence quelques particularités intéressantes ; nous n'en retiendrons que deux, sans du reste entrer dans l'examen des causes : 1° entre le commencement de l'appel par le demandeur et celui de l'appel du demandé, le délai est 72 0/0 plus long dans l'ancien système que dans le nouveau (j'ajoute que, pour une communication renvoyée d'un bureau origine à un bureau destinataire, le temps en question est majoré de 5″,58 dans l'ancienne exploitation et de 2″,37 dans la nouvelle) ; 2° le temps employé à la rupture de la communication est au moins 5 fois plus long. Ou encore, ce qui résume mieux la situation, le temps consacré aux opérations du poste central est, dans un cas, plus du double et près du triple de ce qu'il est dans l'autre : d'où, avec les nouveaux systèmes, économie de premier établissement, économie d'exploitation.

Il me paraît inutile d'insister davantage. Le coup d'œil que nous avons jeté ensemble sur l'état actuel de la téléphonie suffit à faire discerner la multiplicité des problèmes déjà posés par cette industrie née d'hier, la multiplicité des problèmes déjà résolus. Je ne veux cependant pas que mes dernières remarques vous laissent sous une impression fausse. Elles ont porté sur la comparaison de deux systèmes, et, si je devais faire ressortir la très nette supériorité de l'un sur l'autre, il n'en résulte aucunement que l'un des deux soit mauvais ; les données mêmes de la comparaison entraînent la conclusion contraire : la « batterie centrale » prévient des erreurs, évite des hésitations, imprime au service une allure beaucoup plus franche, en accroît dès lors très sensiblement la valeur : il n'en reste pas moins qu'on a tiré pendant des années un parti remarquable du matériel qui l'a précédée ; sonner le demandé 14″,77 après l'apparition du signal d'appel du demandeur et rompre la communication 17″,10 après le signal de fin est vraiment excellent. Il ne faut pas perdre de vue non plus, et c'est le second point sur lequel je voulais vous mettre en garde, que, dans l'un et l'autre cas, ces très bons résultats n'ont pu être obtenus que par un entraînement judicieux du personnel et une pleine coopération de tous vers le but final ; dans cette branche de l'activité humaine comme dans les autres, la méthode et la discipline sont souvent les outils presque déterminants du succès.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Sur les tendances et les recherches actuelles de l'Electrotechnique ; par M. *Paul Janet* 1
Les progrès récents de l'Electrochimie ; par M. *Chaumat* 27
Les principes généraux dans la construction des dynamos à courant continu ; par M. *R.-V. Picou* 54
Les moteurs électriques dans l'industrie ; par M. *A. Hillairet* 63
État actuel de l'industrie des accumulateurs ; par M. *Jumau* 93
Les principes généraux dans la construction des alternateurs ; par M. *Boucherot* 140
Les progrès récents de l'éclairage électrique ; par M. *Pierre Weiss* .. 179
État actuel de la Téléphonie ; par M. *G. de la Touanne* 214

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS,

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6e).

ABRAHAM (**Henri**), Maître de Conférences à l'Ecole Normale supérieure, Secrétaire général de la Société française de Physique. — **Recueil d'expériences élémentaires de Physique**, publié avec la collaboration de nombreux physiciens. Deux volumes in-8° (23 × 14).

Ire Partie : *Travaux d'atelier. Géométrie et Mécanique. Hydrostatique. Chaleur.* Vol. de XII-247 pages avec 260 figures; 1904.

Broché..... 3 fr. 75 | Cartonné..... 5 fr.

IIe Partie : *Acoustique. Optique. Electricité et Magnétisme.* Volume de XII-454 pages, avec 424 figures; 1904.

Broché..... 6 fr. 25 | Cartonné..... 7 fr. 50

GUILLAUME (**Ch.-Éd.**). — **Les applications des aciers au nickel**, avec un Appendice sur la *Théorie des aciers au nickel*. In-8 (22 × 14) de VIII-214 pages, avec 25 figures; 1904..... 3 fr. 50 c.

JANET (**Paul**), Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, Directeur de l'Ecole supérieure d'Electricité. — **Leçons d'Electrotechnique générale** professées à l'Ecole supérieure d'Electricité. 2e édition, revue et augmentée, 2 volumes grand in-8 (25 × 16) avec nombreuses figures.

Tome I : *Généralités. Courants continus.* Volume de XII-369 pages avec 166 figures; 1904..... 11 fr.

Tome II : *Courants alternatifs, sinusoïdaux et non sinusoïdaux. Alternateurs. Transformateurs.* Volume de IV-409 pages avec 156 figures; 1905..... 11 fr.

Tome III : *Moteurs à courants alternatifs. Couplage des alternateurs. Transmission par courants alternatifs. Compoundage des alternateurs. Transformateurs polymorphiques* ..... (*En préparation.*)

JANET (**Paul**). — **Premiers principes d'Électricité industrielle.** *Piles. Accumulateurs. Dynamos. Transformateurs.* 5e édition. In-8, avec 169 fig.; 1903 (*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences*).. 6 fr.

LODGE (**Sir Oliver**), **F. R. S.** — **Sur les électrons.** Conférence faite à l'*Institution of Electrical Engineers* le 5 novembre 1902, traduite de l'anglais par E. Nogues, Chef des travaux d'électricité à l'Ecole centrale, Ingénieur des Arts et Manufactures, et J. Péaudier, Diplômé de l'Ecole supérieure d'électricité, Ingénieur des Arts et Manufactures, avec une *Préface* de P. Langevin, Professeur suppléant au Collège de France. In-16 (19 × 12) de XIII-168 pages, avec 7 figures; 1906.... 2 fr. 75 c.

PICOU (**R.-V.**), Ingénieur des Arts et Manufactures. — **La distribution de l'électricité. Usines centrales.** Petit in-8, avec 27 figures; 1898.

Broché..... 2 fr. 50 c. | Cartonné..... 3 fr.

PICOU (**R.-V.**), Ingénieur des Arts et Manufactures. — **Canalisations électriques : lignes aériennes industrielles.** Petit in-8; 1897.

Broché..... 2 fr. 50 c. | Cartonné..... 3 fr.

38057 Paris. — Imp. GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

NOV 23 1948